

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE GRADO PARA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERÍA**

**“ESTUDIO Y DISEÑO DE UN ENLACE MEDIANTE UN SISTEMA  
DE COMUNICACIÓN ÓPTICA (FSO) EN EL ESPACIO LIBRE  
PARA ENLAZAR EL EDIFICIO PRINCIPAL DE LA ESPE CON  
LOS LABORATORIOS DEL DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA  
Y ELECTRÓNICA”**

**CAPT. DE COM. ACOSTA SÁNCHEZ BOLÍVAR VINICIO**

**SANGOLQUÍ – ECUADOR**

**2011**

## CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente proyecto de grado titulado **“ESTUDIO Y DISEÑO DE UN ENLACE MEDIANTE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA (FSO) EN EL ESPACIO LIBRE PARA ENLAZAR EL EDIFICIO PRINCIPAL DE LA ESPE CON LOS LABORATORIOS DEL DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA”**, ha sido desarrollado en su totalidad por el Sr. Capt. de Com. Acosta Sánchez Bolívar Vinicio.

Atentamente

---

Dr. Gonzalo Olmedo  
DIRECTOR

---

Ing. Raúl Haro  
CODIRECTOR

## RESUMEN DEL PROYECTO DE GRADO

El proyecto titulado “Estudio y diseño de un enlace mediante un Sistema de Comunicación Óptica en el Espacio Libre (FSO) para enlazar el edificio principal de la ESPE con los laboratorios del Departamento de Eléctrica y Electrónica” se presenta como una alternativa de comunicación ante las necesidades de contar con un sistema que permita la transmisión de voz, video y datos, de manera más rápida, segura y robusta entre los diferentes departamentos académicos y administrativos de la Escuela Politécnica del Ejército.

El proyecto para la comunicación mediante un sistema FSO para la transmisión de voz, video y datos que propongo en el presente trabajo de investigación opera en la banda de microonda y posee como elemento principal un haz de luz conectado por un Tx y un Rx, el mismo que permite realizar un enlace óptico en el espacio libre (FSO) de la información a ser enviada por medio de la luz a una frecuencia en el orden de las microondas, considerando que además la comunicación óptica FSO utiliza un protocolo libre.

Este proyecto constituye el punto de partida para presentar la propuesta de un nuevo diseño de comunicación, en base al cual se pueda establecer los requerimientos y bases técnicas de equipos y elementos que conformarán la estructura del sistema FSO, utilizando tecnología de punta y de calidad, además se realiza un análisis económico de las alternativas ofertadas por casas comerciales a fin de elegir la mejor opción y presentar un valor estimado de los costos de implementación que al ser implementada permita satisfacer los requerimientos actuales de los miembros de la ESPE.

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi amada esposa , Jessy Fernanda, compañera ejemplar del sentimiento abnegado, quien con su tolerancia , su cariño y paciencia a sido un apoyo fundamental en el desenvolvimiento de este nuevo triunfo en mi vida profesional y familiar.

A mi querido hijo, Bolívar Fabián, parte de mi ser y de mis entrañas, quien con su alegría y travesuras supo comprender la ausencia de su padre, motivándome día tras día a perfeccionarme y buscar un mejor futuro para mi familia.

A mis queridos padres, Ángel Bolívar y Gladys Edith, quienes han sido mis amigos y protectores durante toda mi vida, apoyándome y respaldándome en todas mis actividades, quienes con su ejemplo y dedicación también son responsables de este nuevo suceso alcanzado en mi vida.

Finalmente quiero dedicar este trabajo a mi amado Dios, principio y fin de mi existencia, quien siempre me ha bendecido y me ha permitido ir alcanzando éxitos durante toda mi vida, sin el cual esto jamás habría sido posible. Mil gracias mi Dios.

**Capt. de Com. Acosta S. Bolívar V.**

## AGRADECIMIENTO

A Dios que a diario guía mi camino y conduce mis pasos con su bendición, permitiéndome tener la confianza y fortaleza suficiente para tomar decisiones apropiadas.

Al Ejército ecuatoriano por haberme brindado la oportunidad de capacitarme y adquirir nuevos conocimientos a través de la ESPE.

A la Escuela Politécnica del Ejército, mi más sincero agradecimiento por brindarme todos los conocimientos académicos, factores relevantes para la consecución de futuras conquistas, anhelados propósitos dentro de nuestro convivir y en las relaciones con la sociedad.

Al Señor Director de la Tesis Dr. Gonzalo Olmedo y al Señor Codirector Ing. Raúl Haro, quienes con sus conocimientos y dirección, supieron orientarme de manera segura y oportuna, haciendo posible la realización de este trabajo.

Y sobre todo un agradecimiento especial a mi esposa, hijo, padres, hermanos, familiares y docentes por su apoyo incondicional a la consecución de mis objetivos y metas a lo largo de toda mi carrera militar.

**Capt. de Com. Acosta S. Bolívar V.**

## PRÓLOGO

En el Proyecto de Grado: “Estudio y diseño de un enlace mediante un sistema de comunicación óptica (FSO) en el espacio libre para enlazar el edificio principal de la ESPE con los laboratorios del Departamento de Eléctrica y Electrónica” se buscó implementar un sistema que, utilizando los conocimientos adquiridos durante la carrera de Ingeniería Electrónica, permita la transmisión de datos, video y voz, empleando un sistema innovador como es el FSO, el cual permita realizar un enlace robusto, con mayores ventajas. Dicha comunicación se la podrá realizar tanto punto a punto o con la utilización de una repetidora, a fin de cubrir un área mayor.

Este proyecto presenta un nuevo diseño acorde a la actualidad tecnológica, considerando que la ESPE es un instituto de educación superior de calidad, el cual no puede estar ajeno a los avances tecnológicos, con el propósito de optimizar los recursos existentes y mejorar el rendimiento de la red actual de manera que la institución pueda brindar un servicio mucho mejor al actual, así como tener un sistema alternativo de transmisión de datos.

El sistema de comunicación que este proyecto presenta cuenta con características sumamente robustas, tomando como punto de partida su velocidad de transmisión, su soporte a la gran cantidad de flujo de información y sobre todo las características de seguridad que el sistema de comunicación FSO ofrece, en ese sentido este trabajo se orienta a la búsqueda de aplicaciones tecnológicas de punta que permitan sofisticar los sistemas de comunicación de la ESPE y de ese modo se pueda brindar servicios mucho mejores a los actuales.

En tal virtud se busca determinar un nuevo diseño físico y lógico de la red de datos de la ESPE a través de un sistema FSO, para lo cual se analizará alternativas de equipos que conformaran la red considerando que cumplan con las normas técnicas respectivas y satisfagan nuestros requerimientos, además se presenta un análisis económico de los equipos y elementos que se necesitan para su implementación.

Llegando a determinar conclusiones y recomendación en base a las experiencias obtenidas en el desarrollo del proyecto, con el propósito de que este estudio pueda ser implementado y desarrollado en la ESPE sin ninguna complicación, teniendo como objetivo final el mejoramiento de los sistemas de comunicación de datos en la ESPE.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

### ***CAPÍTULO 1***

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	2
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	3
1.3.1 Objetivo Principal.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos. ....	3
1.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO .....	4

### ***CAPÍTULO 2***

<b>COMUNICACIONES ÓPTICAS.....</b>	<b>6</b>
2.1 SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS (FSO).....	6
2.1.1 Introducción.....	6
2.2 SISTEMAS ÓPTICOS EN EL ESPACIO LIBRE.....	7
2.2.1 Historia de FSO y sus aplicaciones .....	7
2.2.2 Sistemas Ópticos en el Espacio Libre.....	7
2.2.3 Sistema FSO Externo .....	9
2.3 COMPONENTES BÁSICOS DE UN ENLACE FSO .....	10
2.3.1 Transmisor.....	11
2.3.2 Receptor.....	13
2.4 AVANTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SISTEMA FSO .....	14

### ***CAPÍTULO 3***

<b>COMUNICACIÓN SEGURA DEL SISTEMA FSO .....</b>	<b>20</b>
3.1 SEGURIDAD EN LA TRANSMISIÓN DE DATOS .....	20
3.1.1 Decodificación.....	20
3.1.2 Suplantación de Identidad. ....	22
3.1.3 Posición de Monitoréo.....	22
3.2 PROBABILIDAD DE DETECCIÓN .....	25
3.2.1 Divergencia del Rayo. ....	26
3.2.2 Visibilidad. ....	31
3.3 PROBABILIDAD DE INTERCEPTACIÓN.....	33
3.4 RELACIÓN SEGURIDAD ÓPTICA Y RADIOELÉCTRICA.....	36
3.4.1 Negacion del Servicio.....	39

**CAPÍTULO 4**

<b>PROPUESTA DE DISEÑO DEL ENLACE FSO .....</b>	<b>44</b>
4.1 ENLACE ÓPTICO FSO.....	44
4.1.1 INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO.....	44
4.2 SITUACIÓN ACTUAL DE LA RED DE LA ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO .....	52
4.2.1 Topología de Red. ....	56
4.2.2 Jerarquía de Red. ....	58
4.2.3 Situación actual de la Red Interna de los Laboratorios de Electrónica. ....	60
4.2.4 Situación actual de la Red Interna del Edificio Administrativo. ....	61
4.3 CONSIDERACIONES PRELIMINARES.....	63
4.3.1 Requisitos de las Redes de Área Local(LAN).....	63
4.3.2 Tráfico Medido Actual. ....	65
4.3.3 Distancia del Enlace y existencia de Línea de Vista .....	66
4.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS FSO .....	72
4.4.1 Análisis .....	72
4.4.2 Diseño del Enlace Inalambrico Óptico.....	73
4.4.3 Margen de Enlace o Link Margin.....	88
4.5 ESQUEMA DEL ENLACE PROPUESTO .....	89
4.5.1 Parámetros principales.....	93
4.6 PRINCIPIOS TÉCNICOS DE LAS COMUNICACIONES FSO .....	102
4.6.1 Topologías Redundantes .....	102
4.6.2 Regulación de equipos FSO .....	103

**CAPÍTULO 5**

<b>ANÁLISIS FINANCIERO.....</b>	<b>105</b>
5.1 COSTOS.....	105
5.1.1 Costo de Instalación de la Torre en los Laboratorios de Electrónica.....	105
5.1.2 Equipos de Conectividad.....	107
5.1.3 Licencias.....	111
5.2 COSTOS DE SOLUCIÓN DEL ENLACE FSO .....	111
5.2.1 Costos del Enlace FSO entre el Ed. Administrativo y los Laboratorios de Electrónica .....	111
5.2.2 Costos Totales del Enlace Inalámbrico Óptico en el Espacio Libre (FSO)...	112
5.3 COSTOS DE SOLUCIÓN POR FIBRA ÓPTICA. ....	113
5.3.1 Costos de Enlaces de Fibra Óptica en el Enlace Propuesto.....	113
5.4 COMPARACIÓN DE COSTOS ENTRE FSO Y FIBRA ÓPTICA.....	114

**CAPÍTULO 6**

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>115</b>
6.1 CONCLUSIONES.....	115
6.2 RECOMENDACIONES .....	121

**ANEXOS**

<b>ANEXO No 1 REGULACIÓN DEL ESPECTRO DE FRECUENCIAS.....</b>	<b>123</b>
<b>ANEXO No 2 CÁLCULOS MATEMÁTICOS. ....</b>	<b>126</b>
<b>ANEXO No 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS FSO.....</b>	<b>131</b>
<b>ANEXO No 4 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO GPS .....</b>	<b>137</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla. 4.1. Distribución de la red del campus .....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla. 4.2. Coordenadas Geográficas, Altura y Nivel.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla. 4.3. Valor de la Distancia Horizontal.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla. 4.4. Atenuación Geométrica del Enlace.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla. 4.5. Valores de Visibilidad .....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla. 4.6. Atenuación Atmosférica por Niebla.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla. 4.7. Pérdidas de Equipo FSO.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla. 4.8. Pérdidas de Conectores.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla. 4.9. Pérdidas de Fibra Óptica .....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla. 4.10. Pérdidas por Desalineamiento.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla. 4.11. Pérdidas del Sistema .....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla. 4.12. Margen de Enlace o Link Margin.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla. 4.13. Efectos de los láseres semiconductores estándar sobre la piel y los ojos.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla. 4.14. Clasificación de los láseres .....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla. 4.15. Clasificación de Límites de emisión accesible en watt y dBm.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla. 4.16. Valores MPE en (Wm<sup>-2</sup>) del ojo (córnea) de acuerdo a la duración de exposición (en segundos) y longitud de onda.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla. 4.17. Tiempo de propagación de las señales .....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla. 5.1. Características de la Torre a Construir.....</i>	<i>106</i>
<i>Tabla. 5.2. Valor de la Torre a Construir.....</i>	<i>106</i>
<i>Tabla. 5.3. Características y materiales para el mantenimiento de la Torre existente en los Laboratorios de Electrónica .....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla. 5.4. Valor del Mantenimiento de la Torre ya existente.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla. 5.5. Valores de Equipos FSO para conexión dentro de la ESPE.....</i>	<i>108</i>
<i>Tabla. 5.6. Valores de Conectores.....</i>	<i>109</i>
<i>Tabla. 5.7. Valores de Segmentos de Fibra Óptica .....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla. 5.8. Valor Total del enlace propuesto.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabla. 5.9. Valor Total del Enlace FSO .....</i>	<i>113</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figuraura. 2.1. Esquema simplificado de una transmisión FSO.....</i>	<i>8</i>
<i>Figuraura. 2.2. Ejemplo de la utilización de una Red FSO externa.....</i>	<i>10</i>
<i>Figuraura. 2.3. Esquema de un transceptor FSO Single-Beam da Light Pointe.....</i>	<i>11</i>
<i>Figuraura. 2.4. Tipos de telescopio: (a) kepleriano, (b) galilero e (c) Cassegrain ....</i>	<i>13</i>
<i>Figuraura. 2.5. Ejemplo de una red metropolitana de FSO.....</i>	<i>18</i>
<i>Figuraura. 2.6. Dispositivo FSO conectando dos oficinas a 100 m.....</i>	<i>18</i>
<i>Figuraura. 2.7. Red acoplada, a la izquierda, y topología en anillo, a la derecha. ....</i>	<i>19</i>
<i>Figuraura. 2.8. Configuración Punto-Multipunto y Multipunto a Punto en FSO ..</i>	<i>19</i>
<i>Figuraura. 3.1. Localización de un transmisor omnidireccional.....</i>	<i>24</i>
<i>Figuraura. 3.2. Localización de un Transmisor Direccional.....</i>	<i>24</i>
<i>Figuraura. 3.3. Una transmisión ideal sin divergencia .....</i>	<i>26</i>
<i>Figuraura. 3.4. Una fuente de la transmisión no coherente diverge .....</i>	<i>26</i>
<i>Figuraura. 3.5. Acimut de un patrón de transmisión de RF .....</i>	<i>30</i>
<i>Figuraura. 3.6. Azimut patrón de un láser.....</i>	<i>31</i>
<i>Figuraura. 3.7. Visores 6100 IR de Electrophysics Corporation .....</i>	<i>32</i>
<i>Figuraura. 3.8. Interceptación de una Transmisión Laser de Largo Alcance .....</i>	<i>35</i>
<i>Figuraura. 3.9. Cubo de Haz Divisor .....</i>	<i>35</i>
<i>Figuraura. 3.10. Guerra Electrónica General de Sistemas Militares .....</i>	<i>38</i>
<i>Figuraura. 3.11. Receptor FSO con un amplio campo de visión .....</i>	<i>40</i>
<i>Figuraura. 3.12. Receptor FSO con un estrecho campo de visión.....</i>	<i>40</i>
<i>Figuraura. 3.13. Escenario de implementación de un Misil Busca Laser.....</i>	<i>42</i>
<i>Figuraura. 4.1. Cableado de Fibra Óptica en la Escuela Politécnica del Ejército.....</i>	<i>54</i>
<i>Figuraura. 4.2. Diseño Lógico de la Red Interna de la Escuela Politécnica del Ejército55</i>	<i>55</i>
<i>Figuraura. 4.3. Diseño Físico de la Red de la Escuela Politécnica del Ejército .....</i>	<i>57</i>
<i>Figuraura. 4.4. Niveles de Modelo Jerárquico.....</i>	<i>58</i>
<i>Figuraura. 4.5 Vista superior de los Laboratorios de Electrónica de la ESPE .....</i>	<i>60</i>
<i>Figuraura. 4.6. Visita superior del Edificio Administrativo de la ESPE .....</i>	<i>62</i>
<i>Figuraura. 4.7. Ejemplo de cálculo de las distancias de los enlaces inalámbricos ópticos .....</i>	<i>68</i>
<i>Figuraura. 4.8. Imagen de los Laboratorios de Electrónica y el Edificio Administrativo .....</i>	<i>69</i>
<i>Figuraura. 4.9. Imagen tomada desde la terraza del Edificio Administrativo de la ESPE .....</i>	<i>70</i>

<i>Figuraura. 4.10. Gráfico de descripción de la obstrucción de línea de vista del enlace .</i>	<i>71</i>
<i>Figuraura. 4.11. Solución a la obstrucción de la línea de vista del enlace.....</i>	<i>71</i>
<i>Figuraura. 4.12. Diagrama que muestra la propagación del haz de un láser .....</i>	<i>75</i>
<i>Figuraura. 4.13. Esquema físico del enlace propuesto.....</i>	<i>91</i>
<i>Figuraura. 4.14. Enlace FSO propuestos para el Ed. Administrativo y los Laboratorios de Electrónica de la ESPE .....</i>	<i>92</i>
<i>Figuraura. 4.15 Enlace Inalámbrico Óptico .....</i>	<i>101</i>

## GLOSARIO

<i>ATM</i>	<i>Modo de Transmisión Asíncrona</i>
<i>BER Bit</i>	<i>Error Rate</i>
<i>BER</i>	<i>Tasa de error de bit.</i>
<i>BSC</i>	<i>Control de Estación Base</i>
<i>BSSID</i>	<i>Identificador Básico de Servicio Conjunto</i>
<i>DEE</i>	<i>Departamento de Eléctrica y Electrónica</i>
<i>ECM</i>	<i>Contra Medidas Electrónicas</i>
<i>ECCM</i>	<i>Contra Contra Medidas Electrónicas</i>
<i>ERB</i>	<i>Estación Radio Base</i>
<i>ESPE</i>	<i>Escuela Politécnica del Ejército</i>
<i>FDDI</i>	<i>Interfaz de Datos Distribuidos sobre Fibra</i>
<i>FFAA</i>	<i>Fuerzas Armadas.</i>
<i>FSO</i>	<i>Free Space Optics</i>
<i>GPS</i>	<i>Sistema de posicionamiento global.</i>
<i>IEEE</i>	<i>Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos</i>
<i>IM/DD</i>	<i>Intensidad de Modulación de Detección Directa</i>
<i>IR</i>	<i>Infrarrojos</i>
<i>ITU</i>	<i>Unión de Internacional de Telecomunicaciones</i>
<i>LAN</i>	<i>Red de Área Local</i>
<i>LPD</i>	<i>Baja Potencia de Detección</i>
<i>LPI</i>	<i>Baja Potencia de Interceptación</i>
<i>LPE</i>	<i>Baja Potencia de Explotación</i>
<i>Mbps</i>	<i>Megabits por segundo.</i>
<i>NASA</i>	<i>Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio</i>
<i>OOK</i>	<i>Llave de encendido y apagado</i>
<i>OSI</i>	<i>Interconexión de Sistemas Abiertos</i>
<i>PER</i>	<i>Tasa de Pérdida de Paquetes</i>
<i>RDF</i>	<i>Dirección de Radio Frecuencia.</i>
<i>RF</i>	<i>Radio Frecuencia</i>
<i>Rx</i>	<i>Receptor</i>
<i>SDH</i>	<i>Jerarquía Digital Sincrónica</i>
<i>SNR</i>	<i>Relación Señal Ruido</i>
<i>SSID</i>	<i>Identificador de Servicio Conjunto</i>
<i>TCP</i>	<i>Protocolo de Control de Transmisión)</i>
<i>TELNET</i>	<i>Terminal remoto</i>
<i>TIC</i>	<i>Tecnologías de Información y Comunicación</i>
<i>Tx</i>	<i>Transmisor</i>
<i>UTIC</i>	<i>Unidad de Tecnologías de la Información y Comunicación</i>
<i>VLANS</i>	<i>Red de Área Local Virtual</i>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

La Escuela Politécnica del Ejército es una institución educativa de nivel superior que desde el año 1.922 forma y perfecciona jóvenes ecuatorianos a nivel ingeniería y post-grado, encargada de impartir conocimientos científicos, técnicos y morales en cada una de sus carreras, en la cual es indispensable manejar gran cantidad de información de datos, para lo cual cuenta con equipos informáticos y de comunicación de datos. Los departamentos que conforman la ESPE están comunicados a través de una red de datos que permite la interacción e intercambio de información entre ellos.

Considerando que la actual red de comunicación de datos de la ESPE permite realizar una comunicación e intercambio de información eficiente, y que además en la actualidad esta red maneja gran cantidad de transmisión de datos, voz y video, en ese sentido se ve en la necesidad de crear alternativas para poder solventar esta transmisión de datos a altas velocidades de transmisión, las mismas le permitan continuar brindando un servicio eficiente, y a la vez además introducir en su red de datos una tecnología que permita mantener un tráfico de información totalmente seguro. En tal virtud las actuales tecnologías permiten realizar enlaces mediante sistemas ópticos los cuales son más seguros rápidos y con gran cantidad de transmisión de datos.

La Escuela Politécnica del Ejército busca disponer de enlaces de comunicación de datos operativos, eficientes, seguros y con gran cantidad de transmisión de datos a altas velocidades, los cuales le permitan sostener el tráfico de información y proporcionar una comunicación confiable, robusta y permanente entre los diferentes usuarios de la ESPE.

El avance de la tecnología óptica en la actualidad permitirá cumplir todas las metas y desafíos que la ESPE a través de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) se ha planteado en el ámbito de las comunicaciones. El sistema de comunicación óptico en el espacio libre (FSO) es una tecnología de comunicación óptica que utiliza el espacio libre como medio de propagación, un haz de láser proveniente de un transmisor óptico se propaga por el aire casi siempre en línea de vista y es recibido por un receptor óptico, este tipo de enlace es una muy buena opción considerando que es un sistema altamente transportable, puede ser transmitidos en formato fast-ethernet de 100Mb/s o gigabit-ethernet de 1 Gb/s, incrementando el ancho de banda y por ende la velocidad de transmisión con una seguridad total [1][3].

## 1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El presente proyecto busca realizar el estudio y diseño de un enlace mediante un sistema de comunicación óptica (FSO) en el espacio libre para enlazar el edificio principal de la ESPE con los laboratorios del Departamento de Eléctrica y Electrónica de la ESPE, a fin de realizar el envío y recepción de gran flujo de información y mantener una comunicación permanente. Además de que se permitirá iniciar una investigación en el campo de comunicación óptica, el cual será de mucha valía para la ESPE, considerando que es una tecnología totalmente nueva y de características totalmente innovadoras y aplicables.

El enlace debe estar estructurado de tal forma que posibilite el transporte de múltiples comprimidos de onda en una misma fibra y amplificadores ópticos, de tal manera de alcanzar del orden de decenas de gigabits por segundo en cada fibra, en enlaces de corta y larga distancia, brindar una alta velocidad de transferencia de gran cantidad de datos y de forma muy segura, soportando cualquier aplicativo disponible en la ESPE [5].

De esta manera la ESPE dispondrá de un enlace óptico que permita ofrecer bandas largas elevadas, del mismo orden de los sistemas de fibra y con costos de instalación menores y sin necesitar grandes obras de ingeniería civil, además el enlace brindará

rapidez de operación con posibilidad de enlaces temporarios, usados por ejemplo para la cobertura de grandes eventos que tenga la ESPE [1][5].

Se debe tomar en cuenta que no se necesita licencia de operación, como las licencias de uso de los espectros electromagnéticos, o licencia para obras en vías públicas, necesarias para la colocación de fibras, este tipo de enlace es inmune a interferencias de otros sistemas de telecomunicaciones o sistemas eléctricos, contando a su vez con una elevada seguridad, debido a dificultad de interceptación de la señal [4].

Con esto la ESPE contará con una transmisión de datos sumamente alta que le permita hacer frente a los desafíos actuales de comunicación de datos, además podrá desarrollar y difundir los conocimientos de la ciencia y la investigación de mejor manera, preparando profesionales creativos y emprendedores, con capacidad de solucionar problemas y tomar decisiones en situaciones complejas y críticas, obteniendo el mejor desempeño en cada uno de sus cargos y lo más importante trabajando con tecnología de última generación.

## **1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.3.1 Objetivo Principal**

Estudiar, evaluar, y proponer un diseño de enlace óptico FSO de transmisión de datos, operativo, flexible y seguro, que soporte gran transmisión de datos a altas velocidades para enlazar el edificio central de la Escuela Politécnica del Ejército con los laboratorios del DEE de la ESPE.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Analizar y aplicar FSO para obtener grandes velocidades en la transmisión de grandes volúmenes de datos, a fin de que la ESPE tenga un mejor desempeño.

- Diseñar un enlace FSO de datos con el fin de presentar una propuesta para mejorar el tráfico de información de forma confiable, robusta, segura y permanente, aumentando el volumen de transmisión de datos, en las redes de la Escuela Politécnica del Ejército, mediante comunicación óptica.
- Mejorar las condiciones de seguridad en la transmisión de datos que se realiza en la ESPE, mediante enlaces FSO.
- Diseñar enlaces temporarios, que entre en funcionamiento cuando la ESPE tenga que cubrir grandes eventos.
- Realizar el análisis técnico-económico de las alternativas de infraestructura y equipamiento para la realización del enlace óptico FSO en la Escuela Politécnica del Ejército.
- Presentar un presupuesto general de costos, considerando la mejor opción del mercado, a fin de que en un futuro la ESPE pueda implementar dicho proyecto en sus instalaciones.

#### 1.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

En el presente proyecto busca presentarse como una alternativa de comunicación que permita la transmisión de voz, video y datos, de manera más rápida, segura y robusta entre el los Laboratorios del Departamento de Eléctrica y Electrónica y el Edificio Central de la Escuela Politécnica del Ejercito.

Dicha investigación plantea diseñar un enlace de comunicación mediante un sistema FSO, el cual opera en la banda de microonda y posee como elemento principal un haz de luz conectado por un Tx y un Rx, el mismo que permite realizar un enlace óptico en el espacio libre (FSO) de la información a ser enviada por medio de la luz a una frecuencia en el orden de las microondas, considerando que además la comunicación óptica FSO utiliza un protocolo libre.

A través de la visualización e inspección de las instalaciones para determinar de mejor manera todas las características y necesidades que debemos suplir, este proyecto plantea la comunicación mediante un haz de luz, el cual será TX y Rx por equipos FSO localizados en cada una de las dependencias involucradas en esta transmisión, esta transmisión si o si tiene que estar realizada en línea de vista, en tal sentido se realizara simulación para poder logra este enlace de manera óptima.

Este proyecto además se basa en la seguridad que FSO brinda, de tal maneta que la comunicación no podrá ser interceptada ni bloqueada, considerando que actualmente los equipos de FSO tiene un alcance de transmisión promedio de 10 Km y que a su vez es sensible a las condiciones atmosféricas, se realiza un análisis en el que se considera este tipo de fenómenos como factores que disminuyen la calidad del enlace.

Este proyecto constituye el punto de partida para presentar la propuesta de un nuevo diseño de comunicación, en base al cual se pueda establecer los requerimientos y bases técnicas de equipos y elementos que conformarán la estructura del sistema FSO utilizando tecnología de punta y de calidad, además se realiza un análisis económico de las alternativas ofertadas por casas comerciales a fin de elegir la mejor opción y presentar un valor estimado de los costos de implementación que al ser implementada permita satisfacer los requerimientos actuales de los miembros de la ESPE.

## CAPÍTULO 2

# COMUNICACIONES ÓPTICAS

### 2.1 SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS (FSO)

El FSO es una tecnología de comunicación óptica que utiliza el espacio libre como medio de propagación. Mismo concepto es bastante simple, una faja de láser proveniente de un transmisor óptico, propagado por el aire casi siempre en línea de vista, y recibido por un receptor óptico [10], diversas áreas que puedan ser estudiadas e investigadas, tales como: estimación del canal y modelaje de ruido (para aplicación indoor), modulación y codificación caracterización de la transmisión atmosférica y modelaje de ruido para outdoor FSO, emisores y transmisores, arquitectura de red, interconexiones con otros sistemas, y aplicaciones en nuevos escenarios [1].

#### 2.1.1 Introducción

El objetivo principal es presentar un estudio sobre los diversos parámetros y fundamentos que definen el funcionamiento de los Sistemas de Comunicación Óptica en el Espacio Libre, Free Space Optics (FSO). Es importante determinar y evaluar la viabilidad de la implementación de enlaces reales, así como garantizar la necesidad, la capacidad y la calidad solicitada por el cliente. Por otro lado, el enlace también debe ofrecer una buena comunicación frente a las diversas condiciones atmosféricas adversas.

La propagación de una faja de luz en la atmósfera siempre fue tratada con interés por la comunidad científica. En el caso del laser, el impacto que esta tecnología tendría en la transferencia de datos en altas tasas y a su actual aplicación comercial para diversos tipos de clientes siempre fue motivo de interés.

## 2.2 Sistemas Ópticos en el Espacio Libre

### 2.2.1 Historia de FSO y sus aplicaciones

La historia de la comunicación óptica se remonta inicialmente a la época de la antigua Grecia en la cual enviaban señales luminosas originadas por la luz del sol a través de discos pulidos. En el final de la década de 1880, Alexander Graham Bell proyecto un "fotófono", aparato que transmitía un sonido usando la luz solar modulada.

Entre tanto, la historia moderna de la comunicación de sistemas ópticos puede ser considerada a partir de la invención y el desenvolvimiento del primer laser de rubí en 1960. La comunicación usando una faja de laser modulado fue una de las primeras aplicaciones para el laser. Los primeros experimentos fueron realizados por la NASA en la tentativa de utilizar el laser como un medio de comunicación dentro de una cápsula espacial. La terminología de COMUNICACIÓN DEL LASER EN EL ESPACIO LIBRE, estuvo definida cuando fue propuesta la idea de conectar una faja de laser entre la tierra y varios satélites orbitales, o desde aviones hasta la tierra.

Puede que las primeras tentativas no obtuvieran mucho suceso debido a la poca confiabilidad y a la poca potencia ofrecida por los laser de la época.

El desarrollo del laser permitió utilizar una nueva parte del espectro electromagnético para las telecomunicaciones. Las aplicaciones comprenden desde la transmisión de imágenes vía satélite, lo que permite ahorrar el espacio físico y potencia utilizada en relación a la de un sistema de microonda de un satélite convencional y actual (comprendiendo las antenas y los diversos guías de onda), y una alta tasa de transmisión de hasta 50 Mbps; o las conexiones infrarrojas en ambientes cerrados o internos indoor.

### 2.2.2 Sistemas Ópticos en el Espacio Libre

El FSO es un sistema de transmisión óptica en la cual la faja de luz no se encuentra llevada por fibra, como los sistemas ópticos convencionales, mas se propagan directamente en la atmósfera.

En la Figura 2.1, se encuentra representado un sistema FSO. El transmisor es responsable por la generación de la faja óptica a partir de una señal eléctrica. Siendo compuesta por una fuente óptica, un laser o un LED y por un telescopio, responsable por dar forma a la faja de luz para la propagación en la atmósfera. Así como en los sistemas de fibra, la modulación de la luz tanto puede ser realizada directamente en la fuente óptica cuanto a través de un modulador externo.



**Figura 2.1 Esquema simplificado de una transmisión FSO**

Al receptor le cabe la captación de la energía de la faja después de la propagación por la atmósfera. Es compuesto por un telescopio, el cual debe captar la energía del frente de onda y concentrarla en un punto, para permitir el acoplamiento de esa energía a un foto detector, que convierte la señal óptica nuevamente en eléctrica.

Diferentemente de los sistemas de fibra, el medio de transmisión del sistema FSO, es la atmósfera, esta presenta características que pueden hacer sufrir grandes variaciones con la posición de instalación del enlace, bien como el de correr del tiempo. Ese carácter variante del medio de transmisión torna más compleja la estimación de las pérdidas impuestas a la señal. De esa forma, para la obtención de buenas estimativas para la pérdida de potencia de señal generada por el canal deben ser considerados los modelos para cada uno de los principales fenómenos envueltos en la propagación de la faja óptica en la atmósfera. Los dos principales fenómenos son la absorción y el esparcimiento causados por las moléculas y partículas encontradas en la atmósfera. Otro fenómeno relevante es la cintilación, causada por la turbulencia atmosférica.

La evaluación del desempeño de un sistema FSO, así como de cualquier otro sistema de comunicación, puede ser realizada a través del análisis de la tasa de error de bits (bit error rate – BER), o de la tasa de pérdida de paquetes (packet error rate – PER), en el caso de sistemas digitales y de la relación señal ruido (signal to noise ratio – SNR), para sistemas analógicos.

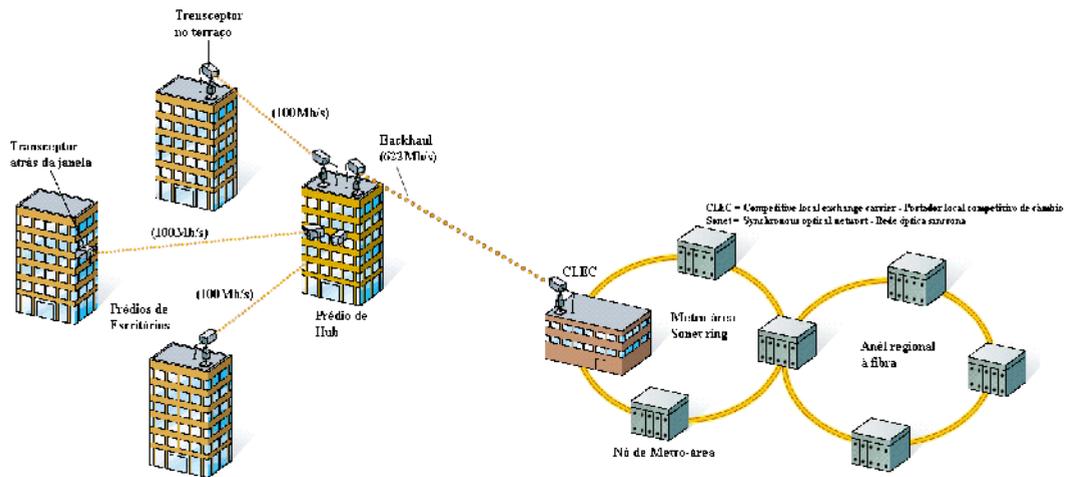
Otra métrica de desempeño importante es la disponibilidad del sistema, que se constituye en el porcentaje de tiempo en que el sistema se encuentra disponible para la transmisión de informaciones, siendo un sistema considerado disponible cuando a su BER o SNR está por arriba de determinados valores límite.

Tanto el SNR cuanto el BER dependen de las características del foto detector y de la cantidad de potencia captada por el receptor. De esa forma, el cumplimiento de requisitos de cualidades, sean usados al BER o al SNR y la disponibilidad, pasa por un cuidadoso balance de potencia [2].

### 2.2.3 Sistema FSO Externo

Desde los principios de la comunicación óptica, el aire era utilizado como medio de propagación de señal. Con la llegada de las fibras ópticas, el FSO dejó de ser intensamente estudiado, debido al aumento de los estudios de las fibras, que en inicio presentaban elevadas pérdidas intrínsecas [11] [12], las cuales, actualmente, son casi nulas, tornándose más eficaces en la transmisión de datos a elevadas tasas y alargas distancias.

Con todo, existen estudios que se orientan a la utilización y comercialización de equipamientos de comunicación óptica FSO [11], conducidos por empresas como Light Pointe™, Fsona™, y Fiber Work, que desarrollan y comercializan equipos de comunicación óptica sin cable. La propuesta comercial y tecnológica del sistema FSO tiene como objetivo lo que se conoce como *the last mile*, o tecnología de última milla, una alternativa de conectividad entre el cliente y el proveedor [13] [14] [15].

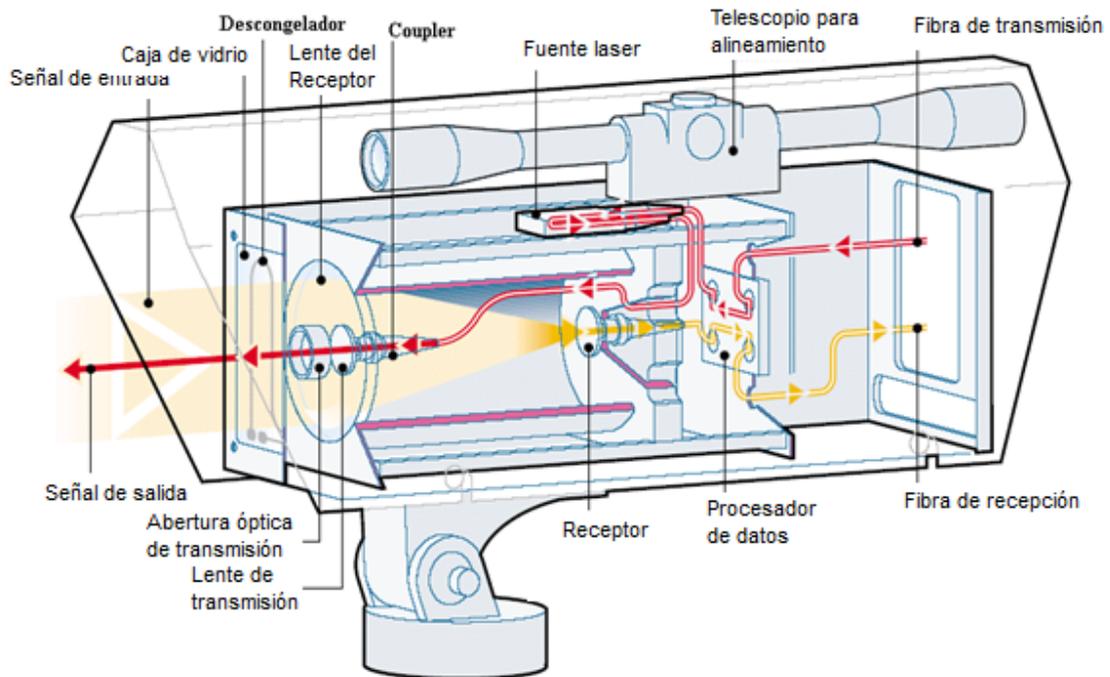


**Figura 2.2** Ejemplo de la utilización de una red FSO externa, acceso a última milla

### 2.3 Componentes básicos de un enlace FSO

Como representa la Figura. 2.1, los componentes constitutivos básicos de un enlace FSO son el transmisor, el receptor y el canal de propagación. En esta sección serán analizadas las características básicas del transmisor y del receptor FSO. Además de estos elementos, tenemos el transceptor, elemento importante del transmisor y receptor, el cual está compuesto por un conversor electro-óptico que convierte señales eléctricas provenientes de una fuente de datos en señales ópticas emitidas en el aire, y un conversor opto-eléctrico que convierte las señales luminosas que llegan al transceptor nuevamente en señales eléctricas.

Una alternativa es presentada en el ejemplo de la Figura 2.2, una señal óptica proveniente de otro equipo es amplificada y después emitida al aire, y la señal que llega por el aire, es enviada por medio de una fibra a otro equipamiento [2].



**Figura 2.3** Esquema de un transceptor FSO Single-Beam da Light Pointe [21].

### 2.3.1 Transmisor

Las funciones básicas del transmisor de un sistema de comunicación es adecuar las características de la señal, como potencia, frecuencia de transmisión y técnica de modulación, al medio de transmisión usado. En el caso de los sistemas FSO, este es responsable por generar la señal óptica modulando y conformando la faja para la transmisión en la atmósfera.

La fuente óptica utilizada puede ser tanto un LED cuanto un laser, la selección entre los dos recae básicamente sobre el nivel de potencia necesario, considerando que la distancia espectral de la fuente no impone limitaciones a la transmisión FSO [6]. Como la atmósfera impone pérdidas graves a la señal óptica, los laser, que ofrecen potencias mayores, son los más utilizados en los enlaces FSO.

La modulación de la faja puede ser realizada de forma directa, modulándose la corriente de la fuente óptica, o externa, a través del uso de moduladores electro-ópticos. La técnica de modulación más utilizada es la modulación de intensidad con detección

directa (IM/DD). [6]. Las técnicas de modulación en fase son muy perjudicadas por la baja coherencia del canal FSO, generada principalmente por la turbulencia, siendo por eso poco utilizadas [6].

Además de la fuente óptica y, posiblemente, de un modulador externo, el transmisor de un enlace FSO es compuesto por un telescopio. Este es responsable de expandir la sección recta de la faja. Esa expansión prevé reducir la posibilidad de obstrucción de la faja por objetos presentes en la atmosfera, como pájaros e insectos, minimizar los efectos de re direccionamiento de la faja causado por la turbulencia, y reducir el ángulo de divergencia de la faja óptica [7].

Los dos principales parámetros del proyecto de un telescopio transmisor son el ángulo de divergencia y el diámetro de la faja transmitida, ya que estas dos influyen directamente en la atenuación geométrica de la señal.

El diámetro efectivo de la faja es comúnmente definido como la distancia entre los puntos en que la densidad de potencia, o irradiación, de la faja óptica cae a  $1/e^2$  de su valor pico, medida en una sección recta de la faja en las proximidades del transmisor.

Los dos principales tipos de telescopio usados son: el kepleriano, que usa dos lentes convergentes, y el galileiano, compuesto por un lente divergente y un convergente [7].

Los telescopios citados son conocidos como refractores, por poseer lentes con sus elementos principales. La principal desventaja de estos es la variación de la distancia focal de los lentes con la compresión de onda. Este problema puede ser controlado con el uso de lentes especiales de tipo cromáticos [8].

Ahora los telescopios reflectores, en los cuales los lentes son substituidos por espejos, como en los telescopios Cassegrain, donde uno de los lentes es substituido por un espejo hiperbólico divergente y el otro lente es substituido por un espejo parabólico convergente. La ventaja de los telescopios reflectores es que ellos son cromáticos, o sea, sus características no varían con la compresión de la onda [8].

Las tres diferentes configuraciones de telescopio citadas están representadas en la Figura 2.4

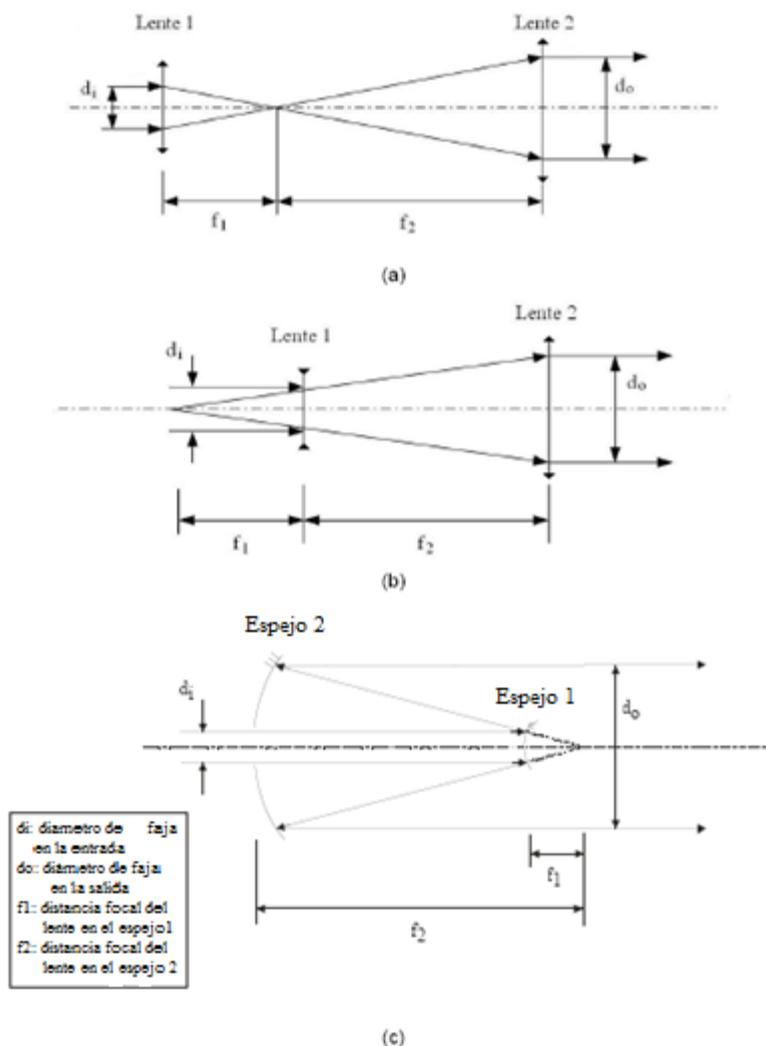


Figura 2.4 Tipos de telescopio: (a) kepleriano, (b) galileiano e (c) Cassegrain

### 2.3.2 Receptor

El receptor es compuesto por un telescopio y por el foto detector. El telescopio del receptor tiene como función captar la radiación óptica de un área grande y focalizarla en el foto-detector o fibra óptica, que poseen áreas muy pequeñas (del orden de decenas de  $\mu\text{m}$ ).

Hay diversos tipos de telescopio que pueden ser empleados. Con todo, nuevamente los telescopios más comunes son el kepleriano y el galileiano, semejantes a los usados en el transmisor, además del Cassegrain. La relación entre los diámetros efectivos de la faja en la entrada y salida del telescopio es semejante a la obtenida por el telescopio transmisor [7].

Otro parámetro importante del telescopio receptor es el ángulo de visado (field of view- FOV), que define la faja angular de las fajas incidentes que el telescopio consigue acoplar a la fibra de recepción o foto-detector. Cuanto mayor es el FOV del receptor menos crítico será el alineamiento, de modo que el enlace será más robusto contra las variaciones angulares generadas por la turbulencia. Con todo, para valores elevados de FOV tornase mayor captación de ruidos y mayor posibilidad de sufrir interferencia de otros enlaces FSO paralelos.

Así, cuanto mayor sea el diámetro del receptor, o la fibra, mayor será la potencia captada. Por eso, en los receptores FSO son comúnmente usadas fibras multi modo, que poseen núcleos con diámetros en torno de 62,5  $\mu\text{m}$ , mucho mayores que el núcleo de las fibras mono modo, que están en la faja de 10  $\mu\text{m}$ .

En el receptor de enlace FSO pueden aun ser usados filtros, cuyo objetivo es reducir el ruido óptico captado. Estos filtros permiten que apenas el comprimido de onda de interés llegue al recepto, reduciendo así el ruido.

## 2.4 Ventajas y desventajas del sistema FSO

El sistema FSO presenta diversas ventajas en su utilización, las principales son: movilidad del sistema, los transeptores pueden ser instalados para proveer conectividad temporal pudiendo posteriormente ser movido o trasladado para otras localidades [16]; transparencia en el protocolo de datos [15], en algunos equipos los datos pueden ser transmitidos en formato *fast-ethernet*, Ethernet de 100Mb/s, o *gigabit-ethernet*, Ethernet de 1Gb/s, [17]; y seguridad en los datos transmitidos, ya que no es posible interceptar y recuperar los datos de manera indebida [18]. Otras ventajas surgen cuando es comparado con transmisores de RF, pues el sistema FSO no posee regulación de frecuencia de

portadora; las tasas de transmisión del sistema FSO pueden llegar a las mismas aplicadas en las fibras ópticas, lo que no sería posible utilizando RF; además de la seguridad de los datos [19].

Los sistemas de comunicación FSO son mucho menores y de menor peso que los sistemas RF. Pueden entonces ser portátiles, la potencia necesaria es pequeña y el ángulo de apertura de la faja es estrecho, tornando la comunicación entre dos puntos muy segura. Para que la señal pueda ser interceptada, un receptor deberá ser colocado en la ruta de la faja transmitida.

Los sistemas FSO entran con mayor fuerza en el escenario de las telecomunicaciones debido principalmente a la expansión del internet. Con las comunicaciones en FSO, la transmisión de datos y las aplicaciones para video e imágenes se tornan económicamente viables, y sin la necesidad de cavar fosas o canales tal cual para las fibras ópticas. La ciudadanía cada vez siente más inconformidad con este tipo de obras en las que se realizan canales o surcos para fibra. Los sistemas FSO ofrecen una solución atractiva al problema de “última milla”, sin necesidad de huecos y obras obligatorias para un enlace de fibra óptica.

Otras ventajas del sistema FSO son:

- Instalación rápida y a bajo costo del sistema.
- No son necesarias licencias para el uso del espectro electromagnético.
- El ancho de banda del sistema FSO, es sumamente competitivo con el de fibra óptica, y ciertamente mucho mayor que la de radio microondas.
- El sistema FSO no provoca interferencia electromagnética en otros aparatos.

En contra partida, los sistemas FSO poseen un gran número de desventajas en cuanto a su utilización, tales como: alta dependencia de las condiciones climáticas y de visibilidad; estabilidad en el alineamiento, temperatura ambiente, las variaciones en la temperatura perjudican la faja.

Otra desventaja que requiere un cuidado elevado es la manipulación de los enlaces FSO debido a la emisión de laser de alta potencia directamente al aire, por eso existe un

término llamado “seguridad de los ojos”, *Eye Safety*, ya que la exposición prolongada de los láser en los ojos pueden causar serios daños en la visión de las personas que manipulan este tipo de equipamientos [20]. Por este motivo los locales donde son instalados poseen acceso restringido al personal entrenado. Y las empresas que producen este tipo de equipamientos utilizan largas ondas comprimidas en el espacio visible para reducir al máximo los posibles daños a eventuales exposiciones a las fajas laser.

La desventaja encontrada en este tipo de sistema es relacionada con la propagación óptica a través de la atmósfera. Los comprimidos de onda son comparables en tamaño, con las partículas y moléculas presentes en el medio ambiente, haciendo que la energía del laser sea absorbida.

Los sistemas FSO pueden ser usados en conjunto con las redes de fibra óptica y sistemas celulares. Cualquier tipo de operadora puede usar esta tecnología como acceso a áreas densamente pobladas, donde la instalación de fibra sería problemática o excesivamente cara. Las operadoras de servicio sin cable buscan obtener soluciones escalonables que permitan aumentar la capacidad de transferencia de datos manteniendo la conectividad entre las Estaciones Radio-Base (ERBs) y la Base Station Controller (BSC).

Los sistemas ópticos sin cable presentan un bajo costo y rapidez en la instalación, presentando una solución práctica. Puede ser instalado en las mismas estructuras de los sitios de las redes de celulares, no provocando interferencia con los sistemas de micro onda. Adicionalmente el periodo de test se reduce de meses por apenas días.

Como muchos de los factores que influyen en la calidad de la señal pueden ocurrir de manera aleatoria, un factor común de análisis del sistema FSO es la disponibilidad de señal, que es el porcentaje de tiempo en que el sistema permanece operable sin interrupciones. Para que la pérdida de señal sea ideal, la duración máxima de la interrupción en relación al tiempo total de operación del sistema no debe sobrepasar el 0,0001% en un año. Del mismo modo la viabilidad está relacionada con la disponibilidad de señal. Un enlace FSO es viable desde que la disponibilidad de señal local este dentro de los parámetros previstos en el proyecto de implementación.

La diferencia entre los sistemas con fibras ópticas y los sistemas con FSO consiste en la capacidad de previsión de la atenuación del sistema, ya que en una red de fibra óptica se tiene de 0,2 a 0,5 dB/km para fibras mono modo y de 2 a 3 dB/km para las fibras multi modo; y en FSO la atenuación es definida por las condiciones de propagación. Como la temperatura, humedad, visibilidad, velocidad del viento, etc., varían entre un punto y otro de la ciudad, determinados enlaces pueden ser atenuados con mayor o menor intensidad. De esta forma una disponibilidad del 100% del tiempo no es garantizada. Se debe tomar en cuenta la localización del enlace en la ciudad, un enlace que este frente al mar tiene mayor posibilidad de sufrir una mayor atenuación con la brisa de la mañana, o las corrientes de viento, creando diferentes índices de refracción atmosférica, además de que el mar ofrece una mayor concentración de salinidad, creando divergencia en el laser.

Otros factores pueden ser mencionados: Alta concentración de neblina o la polución, o el continuo pasar de aves y o insectos, interfiriendo con la trasmisión. La proximidad del enlace a áreas que tengan una gran cantidad de árboles o de agua, crea áreas de aire caliente que pueden interferir en la focalización del laser. Este fenómeno es llamado de cintilación, el cual también acontece en las zonas urbanas, sobre todo donde existen edificaciones con techo de metal, o con materiales capaces de retener el calor, que es después liberado. Un ejemplo de cintilación es observado en las vías en un día de calor.

La estabilidad de un predio – originada por la continua vibración del tránsito de automóviles, tanto alrededor como en el propio predio – es otro factor que produce una pérdida de directividad de la faja del laser [13], [14].

Una idea de aplicación del Sistema FSO se encuentra en la instalación de una red en malla sobre los predios de una ciudad, como ilustra la Figura 2.5. Esto permite un rápido aprovechamiento de este sistema (de horas hasta días, contando con las etapas de instalación, test y total funcionamiento de la red) en relación a la instalación de una red de fibra óptica, (que, de acuerdo con el tamaño de la red, puede demorar varios meses).



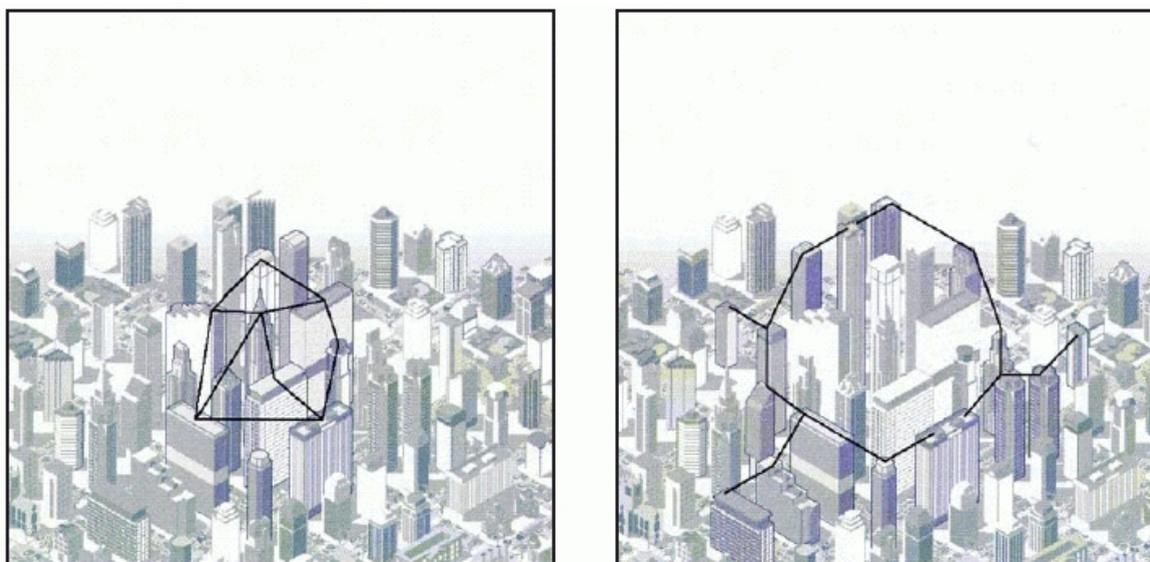
**Figura 2.5 Ejemplo de una red metropolitana de FSO**

Actualmente se encuentran distribuidos por el mundo diversos equipos de FSO en operación. Considerando que los fenómenos climáticos afectan la capacidad de transmisión, se puede encontrar links FSO en Manhattan, Londres, China, entre otros, Abajo en la Figura 2.6 es representado un ejemplo de una instalación FSO en Manhattan.

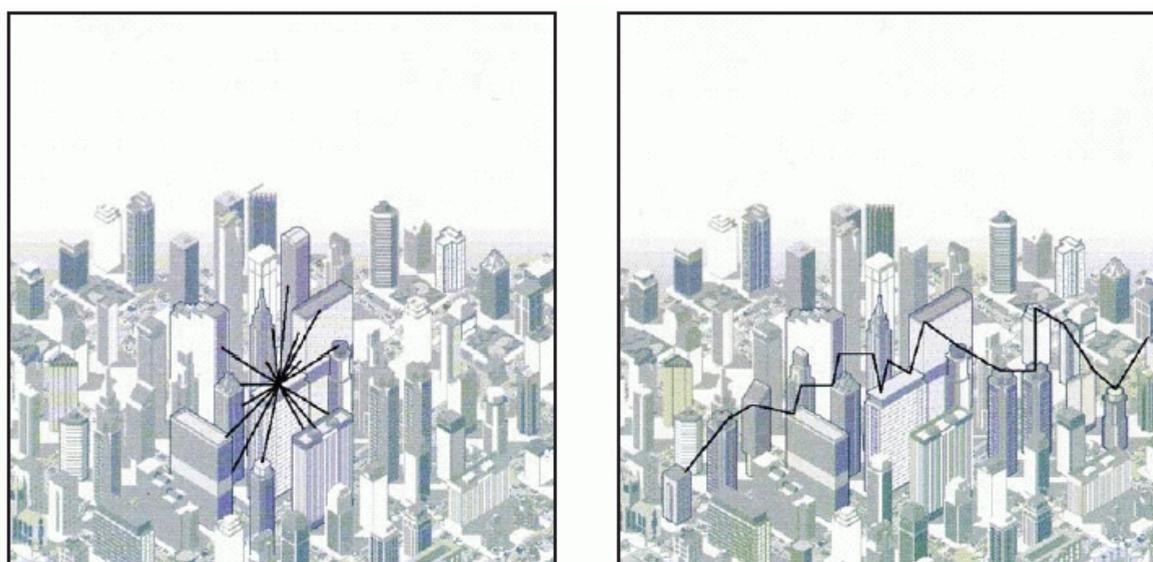


**Figura 2.6 Dispositivo FSO conectando dos oficinas de derecho, Cadwalader, Wickersham & Taft, a 100m en edificios comerciales en Manhattan, link de 1,25 Gb/s**

La tecnología FSO permite utilizar tanto enlaces ópticos punto a punto como otras configuraciones acopladas, punto-multipunto, múltiplo punto a punto, entre otros [14]. La Figura 2.7 y Figura 2.8 presentan topologías de enlaces ópticos posibles utilizando sistemas FSO.



**Figura 2.7 Red acoplada, a la izquierda, y topología en anillo, a la derecha [14]**



**Figura 2.8 Configuración Punto-Multipunto, a la izquierda, y Multipunto a Punto, a la derecha**

## CAPÍTULO 3

### COMUNICACIÓN SEGURA DEL SISTEMA FSO

Al hacer un análisis más pormenorizado y detallado de la seguridad que ofrecen los sistemas de comunicación FSO y considerando que la ESPE forma parte de FFAA, se orientará este capítulo casi en su totalidad a dar a conocer las aplicaciones que tienen estas características de seguridad en el campo militar, mas ciertas características generales aplicables en redes civiles.

#### 3.1 SEGURIDAD EN LA TRANSMISIÓN DE DATOS

En el ámbito de la seguridad de las comunicaciones, la probabilidad de explotación de comunicaciones incluye la posibilidad de que la señal sea decodificada o descifrada, una suplantación de identidad del transmisor-receptor enemigo por un transmisor-receptor legítimo, y por último el enemigo es capaz de localizar la posición del emisor y / o receptor.

##### 3.1.1 Decodificación

La mayoría de los sistemas FSO de hoy emplean claves de encendido y apagado (OOK) modulación o alguna variante. OOK es donde la presencia de una señal representa un binario "1", mientras que la ausencia de la señal representa un binario "0".

Por lo tanto, si un enemigo puede interceptar una transmisión de láser, no debe haber dificultad en la extracción de los 1 y 0. Si bien se ha explicado que los enlaces FSO tiene una baja probabilidad de intercepción, existe todavía una pequeña probabilidad de interceptarlos. Por lo tanto, cifrar enlaces FSO es todavía recomendado.

FSO es una capa de un servicio en el modelo OSI (transmisión física). La mayoría de redes de hoy en día no intentan cifrar la capa de una modulación. La encriptación es por lo general dejada a las capas superiores del modelo OSI. Esto es así que incluso si el enemigo fuera capaz de obtener la serie de 1 y 0 de la transmisión física, sería muy difícil hacer sentido de ellas.

Aunque en general se acepta dejar el cifrado para las capas superiores del modelo OSI, de hecho existen métodos de encriptación en las transmisiones de una capa física. En el campo de la comunicación caótica, la complejidad del soporte utilizado en el transmisor hizo aumentar a un observador sólo de experiencia aleatoria de señales. Populares métodos de codificación y decodificación de mensajes en las comunicaciones caóticas incluyen enmascaramiento, desorden para afinar el desplazamiento, y desorden de modulación [9]. La sincronización de estos receptores ha sido un reto, y las implementaciones prácticas para los rayos láser han sido en gran parte confinadas a los cables de fibra óptica. El rango de un enlace FSO que emplea la comunicación caótica se espera que disminuya de manera significativa debido a la sensibilidad a los cambios en la señal.

No sólo en la comunicación caótica las señales son difíciles de descifrar, también son difíciles de reproducir. Proponentes de seguridad saben que esto significa dificultad para un adversario que quiere llevar a cabo ataques "man-in-the-middle. Aquí es donde los enemigos bloquean del adversario la señal transmitida desde el receptor previsto y regeneran una versión modificada para el receptor.

La Comunicación caótica está aún en pañales y no se recomienda su uso en los enlaces FSO. La razón principal de esto es que el resultado es de corto rango, que es ya un problema con los enlaces actuales. Además, del cifrado siempre por la capas superiores de OSI, junto con la baja probabilidad de interceptación debe ser capaz de

proporcionar una protección suficiente contra un adversario que intenta decodificar la señal.

### 3.1.2 Suplantación de Identidad

Suplantación (Spoofing) es cuando un adversario se disfraza como un transmisor-receptor ambiente. Un transmisor falso puede enviar información falsa y perjudicial (compromiso de integridad de los datos), mientras que un receptor que imita puede robar información sensible o clasificada (compromiso de confidencialidad de los datos).

La suplantación de identidad es generalmente evitada mediante el uso de algún régimen de autenticación segura. Esto normalmente implica el intercambio de claves secretas. La autenticación por lo general se lleva a cabo durante todo el camino hasta llegar a la capa de aplicación en el modelo OSI.

En las capas inferiores del modelo OSI, la autenticación entre los transceptores puede llevarse a cabo (aunque de manera informal) a través del uso de encriptadores. Los datos cifrados enviados a un receptor falso serían de poca utilidad. Un receptor amigable esperando recibir datos cifrados rechazaría datos que sean encriptados o codificados de forma incorrecta.

La direccionalidad de los rayos laser en FSO también puede reducir la probabilidad de un transmisor-receptor falso. Si la ubicación de los transmisores-receptores son conocidas y se señalan unos a otros, el riesgo de suplantación de identidad es baja. La suplantación (Spoofing) del transceptor requeriría que este se encuentre a lo largo de la línea de visión entre los dos amistosos transceptores.

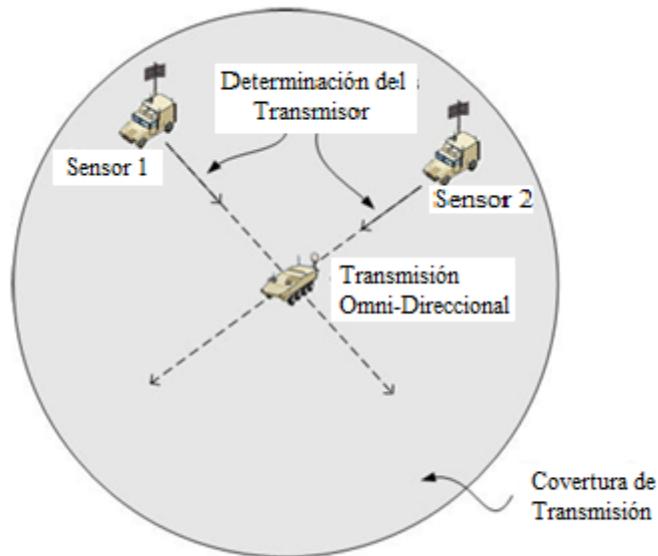
### 3.1.3 Posición de Monitorización

La determinación de la ubicación de los transmisores de línea de vista como enlaces microondas y FSO es generalmente más difícil que localizar la transmisión de radio omnidireccional.

La direccionalidad de los enlaces de microondas y de FSO puede aparecer para dar facilidad de distancia a la dirección en la que el rayo viene y va. Sin embargo, la dirección de un transmisor omnidireccional también se puede determinar mediante la exploración de la dirección en que la señal recibida es más fuerte. Esto también significa que la dirección en la que un transmisor omnidireccional se encuentra se puede determinar prácticamente en cualquier lugar alrededor del transmisor. Por el contrario, la dirección de un radio de microondas de línea de vista o transmisor FSO sólo puede ser determinado por un interceptor que se encuentra dentro de la línea de vista. Es más direccional en el vínculo, hay menor oportunidad para que el interceptor busque en esa línea de vista. Por lo tanto, un enlace FSO con un rayo típico de divergencia de alrededor de 0.05 grados, tiene menos probabilidad de que se revele su posición, que la de una transmisión de radio microondas con una divergencia del haz típico de 2 grados. Por lo tanto, la probabilidad de control de la posición depende de la probabilidad de la interceptación de la transmisión.

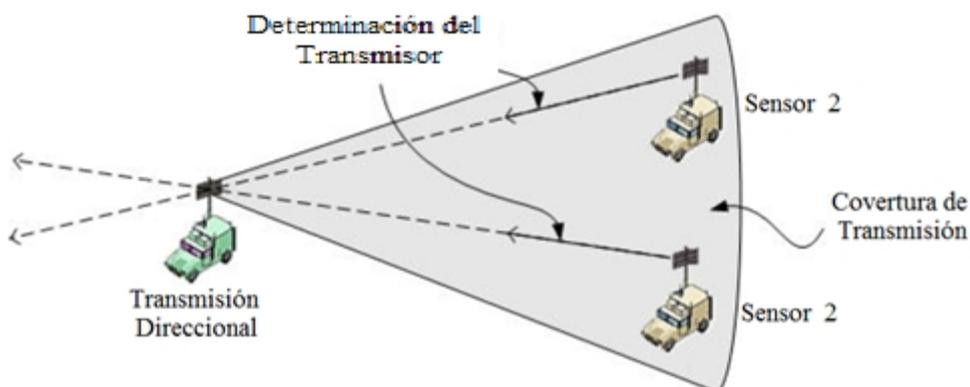
Sabiendo la dirección en la que un transmisor puede ser situado hay que determinar solo la mitad del problema o sea la posición del emisor. El otro parámetro necesario es la distancia. Usando un solo sensor, la distancia desde el sensor hasta el transmisor sólo se puede estimar si la potencia de transmisión es conocida. Puesto que la señal de transmisión se atenúa con la distancia, la distancia del transmisor del sensor se puede estimar conociendo la atenuación atmosférica, así como la potencia recibida. Por ejemplo, si se sabe que el transmisor emiten un láser de potencia de 100 mW, y que la atenuación atmosférica es de 3 dB / km (la mitad de energía por kilómetro), la potencia recibida es de 50 mW, a continuación, el transmisor se estima en un kilómetro de distancia.

Si la potencia de transmisión o la atenuación atmosférica no se conoce, existe un método más preciso para determinar la ubicación del transmisor, mediante una definición a través del uso de dos o más sensores. La Figura 3.1 ilustra cómo dos sensores pueden detectar un transmisor omnidireccional. Los dos sensores están separados y deciden individualmente la dirección (rumbo) en el que la transmisión es más fuerte. La intersección de estos rodamientos sería la ubicación del transmisor.



**Figura 3.1 Localización de un Transmisor Omnidireccional**

Este mismo método de localización puede ser aplicado a las antenas direccionales. Las antenas con mayor potencia y mayor alcance pueden ser más fácilmente detectadas. Esto es porque las antenas direccionales, como las utilizadas para la radio de microondas tienen pequeños ángulos de divergencia de alrededor de 2 grados, la propagación de la señal aumenta rápidamente con la distancia. Esto se ilustra en la Figura 3.2.



**Figura 3.2 Localización de un Transmisor Direccional.**

Cuanto menor sea la divergencia de la señal de transmisión, más difícil es determinar la ubicación del transmisor. El ancho de una transmisión de microondas con un divergencia de 2 grados es de aproximadamente 350 metros después de 10 km. Esto debería dar espacio suficiente para que los sensores puedan calcular la ubicación del transmisor. Un transmisor FSO con una divergencia del haz típica de 0.05 grados tendría un ancho de haz de menos de 10 m después de viajar 10 km. Esta separación para los sensores puede no ser suficiente para dar una buena estimación de la ubicación del transmisor al considerar los errores en la determinación de la dirección del transmisor.

Cabe destacar que las transmisiones direccionales también dan al adversario una indicación aproximada de la ubicación del receptor. En este caso, mientras más direccional es la transmisión, más fácil sería localizar el receptor. Por lo tanto, transmisiones direccionales como la radio microondas y FSO dan al adversario una mejor idea donde esté ubicado el receptor, mientras que un transmisor omnidireccional no revela esto.

En la sección posterior que habla sobre la probabilidad de detección de las transmisiones FSO, se presenta que los láseres son invisibles al infrarrojo y que los que utilizan los sistemas FSO todavía puede ser "vistos" desde fuera del haz de láser a través de la utilización de dispositivos especiales electro-ópticos que convierten las longitudes de onda invisibles en visibles. Esto requiere una cantidad razonable de dispersión del láser, posiblemente por la niebla o el humo. Esta "visibilidad" de rayos láser directamente podrá divulgar la ubicación de los transmisores de FSO y / o receptores.

### 3.2 PROBABILIDAD DE DETECCIÓN

La forma convencional de detectar una transmisión RF es a través de la utilización de analizadores de espectro de radiofrecuencia. Estos no se pueden utilizar para detectar transmisiones de láser. A fin de detectar una transmisión láser, se necesita un receptor compatible FSO o alguna forma de sistema electro-óptico para convertir las frecuencias ópticas en señales eléctricas.

En general, hay dos lugares en los que puede ser un rayo láser detectado. En primer lugar, se puede detectar desde el interior de la rayo. La divergencia del haz determina la probabilidad de detección desde el interior de la rayo. En segundo lugar, el haz puede ser "visto" desde fuera de la rayo. En este caso, la "visibilidad" de la rayo se determina si se puede detectar.

### 3.2.1 Divergencia del Rayo

Una transmisión electromagnética ideal viajará directamente al receptor. Sin embargo, esto requiere de una fuente totalmente coherente. Es decir, las ondas electromagnéticas en el origen deben tener una relación de fase constante. Esto implica que sólo se transmite una única frecuencia, que es difícil de lograr en la práctica. Si una fuente es incoherente, las ondas electromagnéticas en la fuente se interfieren entre sí, causando que la viga se diverja.



Figura 3.3. Una transmisión ideal sin divergencia

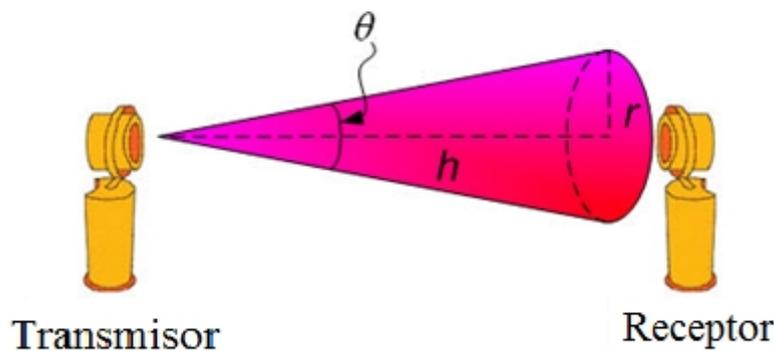


Figura 3.4 Una Fuente de la Transmisión no coherente diverge

Como se muestra en la Figura 3.4., cuando una señal de transmisión se aparta, se forma un cono con la punta en el extremo del transmisor. En la práctica, se trata de un cono esférico, y que la base del cono es curvo. Sin embargo, por simplicidad, suponemos que la base es plana, dando un cono normal.

Transmisores de radio del Estado-de-el arte-y de microondas tienen un ángulo de divergencia ( $q$ ) de unos pocos grados. El láser, por el contrario, se genera a través de longitud de onda controlada por las emisiones de fotones. La mayoría de ellos generar luz en una banda muy estrecha alrededor de una sola longitud de onda, en el centro. Debido a esta característica los láseres visibles se manifiesta como muy puros, de un solo color, la anchura de línea estrecha se denomina mono-cromaticidad. Por ejemplo, el láser de neodimio usado en la mayoría de los designadores láser (el omnipresente "Nd:YAG") genera un haz de salida a 1,064 micrones, con un ancho de banda típica de 0,00045 micras, una anchura de línea increíblemente estrecho de 0,04 por ciento de la longitud de onda central.

Por lo tanto, las emisiones láser son altamente coherentes. De esta manera, los rayos láser suelen tener una divergencia de menos de un mili-radián (aproximadamente 0,057 grados). Algunos sistemas pueden ser diseñados para tener divergencias sub-micro-radián. Un rayo láser con una pequeña divergencia de un mili-radián se expandiría a un metro de diámetro después de recorrer un kilómetro.

Debido a su pequeño tamaño, los láseres de diodos semiconductores suelen tener divergencias que se miden en grados, en plena expansión. Sin embargo, esta divergencia del haz puede reducirse considerablemente mediante el uso de colimadores. Un colimador es un dispositivo para cambiar la divergencia de la luz u otra radiación de una fuente puntual de un haz paralelo. Un sistema láser con un diámetro del haz de salida de un metro fácilmente podría tener un haz de 0,05 mili-radianes de divergencia, con una expansión de sólo unos 25 metros después de recorrer 500 kilómetros. Este haz de lápiz como de la luz permite una colocación precisa de gran energía en un objetivo para enlaces de comunicación eficaces. El rayo puede ser utilizado para aplicaciones encubiertas, porque es muy difícil de detectar sin interceptar el haz de él. La desventaja, por supuesto, es señalando que la viga requiere un alto grado de precisión, que se discutirá más adelante en este capítulo.

Los lugares en los que un enemigo podría detectar una transmisión láser efectiva es en cualquier lugar dentro del volumen del cono descrito anteriormente. Un haz muy divergente implica que hay más lugares en los que el enemigo podía detectar la señal transmitida. El volumen del cono se encuentra dado por la fórmula,  $\frac{1}{3} r^2 h$  donde  $r$  es el radio de la base del cono, y  $h$  es la máxima distancia desde el transmisor en el que la señal transmitida es todavía del poder suficiente para ser detectada.

Para fines de comparación, se supone que una señal de transmisión puede llegar a una distancia de 20 km (es decir,  $h = 20000$  m).

Para un transmisor de microondas con un ángulo de divergencia de 2 grados,

$$r = h \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$r = 20000 \tan\left(\frac{2}{2}\right)$$

$$r = 349,1 \text{ m}$$

Volumen del cono

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 h$$

$$V = \frac{1}{3} \pi (349,1)^2 20000$$

$$V = 2552,456276 \text{ km}^3$$

Para un transmisor láser con un ángulo de divergencia de 2 segundos de arco,

$$r = h \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$r = 20000 \tan\left(\frac{2}{3600} \times \frac{1}{2}\right)$$

$$r = 0,1 \text{ m}$$

Volumen del cono

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 h$$

$$V = \frac{1}{3} \pi (0,1)^2 20000$$

$$V = 209 \text{ m}^3$$

El volumen del cono de transmisión para el transmisor de microondas es más de 12 millones de veces mayor que la del transmisor de láser. Se puede interpretar que un adversario tiene 12 millones de veces más probabilidades de detectar una transmisión de microonda que una de FSO.

Muchos factores pueden afectar para que un espía pueda ser capaz de localizar un detector dentro del volumen del cono. Por ejemplo, la localización de un detector entre dos aviones o entre un barco y un avión puede ser mucho más difícil que entre dos sistemas terrestres. Por lo tanto, mientras que el ángulo de divergencia influye en gran medida la probabilidad de la detección de las transmisiones de láser, la viabilidad de ubicar un detector dentro de ese cono de transmisión también es un factor importante.

Cabe destacar que si bien el concepto de divergencia del haz es una descripción aceptable de una transmisión por láser, por lo general no así para transmisiones en RF. Las transmisiones espurias fuera de la viga principal se transmiten generalmente por antenas de RF. Estas transmisiones no esenciales se llaman lóbulos laterales. Ampliar las antenas de RF suele reducir la intensidad de estos lóbulos laterales. Sin embargo, muchas aplicaciones requieren que las antenas sean pequeñas. Estos lóbulos laterales ofrecen más oportunidad para que un intruso detecte la señal transmitida.

Las transmisiones de RF tienen un patrón de acimut similar a la mostrada en la Figura 3.5. La mayoría de la potencia de una antena de RF se concentra en un lóbulo principal. La Figura también ilustra que la divergencia ( ) del haz de las transmisiones de RF se determina tomando el ángulo formado por el lóbulo principal en los puntos de

media potencia ( $1/2P_0$ ). es también conocido como el ancho de haz de media potencia.

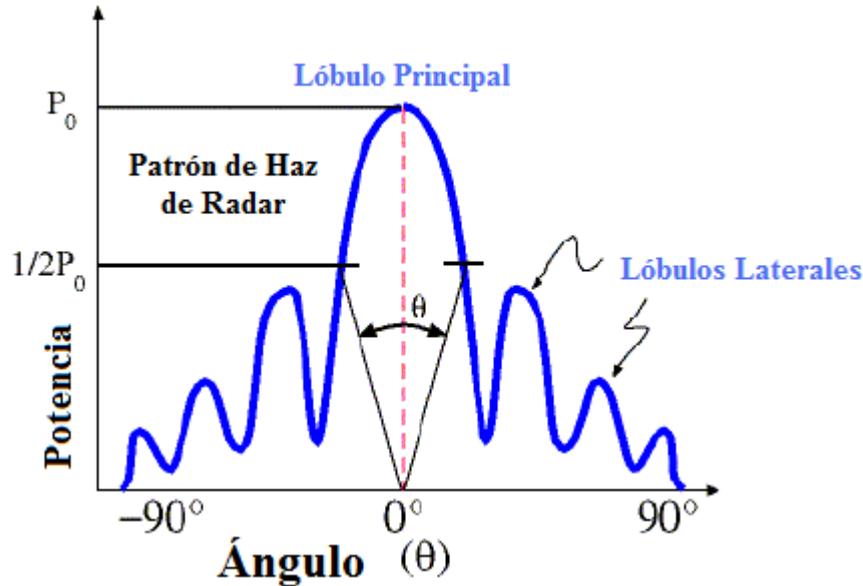


Figura 3.5 Acimut de un Patrón de Transmisión de RF [21]

Además del lóbulo principal, varios lóbulos secundarios se pueden formar. Aunque los lóbulos laterales son de menor potencia que el lóbulo principal, que aún representan las falsas emisiones fuera de la dirección prevista de la comunicación. Varios diseños de antena hasta llegan a tener unas emisiones detrás de las antenas. Por lo tanto, un espía puede ser capaz de detectar estas emisiones no esenciales, si está lo suficientemente cerca del transmisor.

La Figura 3.6., ilustra un patrón típico del acimut de una transmisión de láser. Un patrón de acimut muestra la dirección angular de las transmisiones. Como puede verse en la Figura, los rayos láser por lo general sólo irradian en la dirección que está señalando.

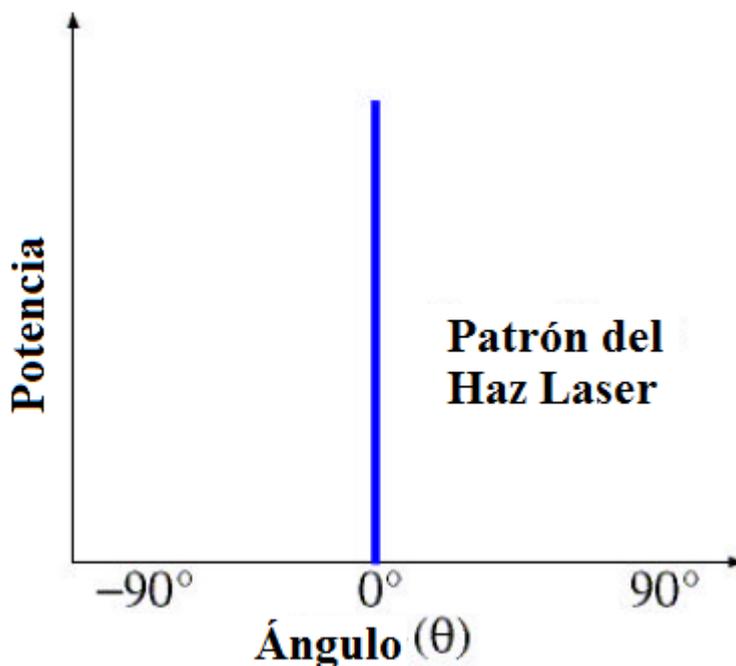


Figura 3.6 Azimut patrón de un láser [21]

En resumen, los láseres tienen una probabilidad mucho menor de detección que las transmisiones RF, debido a la divergencia pequeña del haz y a la ausencia de falsas emisiones como la de los lóbulos laterales.

### 3.2.2 Visibilidad

Muchos proveedores afirman que una de las razones por las que los enlaces FSO son seguros es debido a que el láser que utilizan está cercano a la banda del infrarrojo y por lo tanto invisible y oculto. Por lo tanto, un enemigo no sería capaz de detectar un vínculo FSO. Si bien esto es algo cierto, un haz de FSO todavía se puede detectar si el enemigo tiene las herramientas adecuadas y medio ambiente más oportuno para detectar el haz.

Una escena juega a menudo en las películas, un héroe tiene que llegar al otro extremo de una habitación para recuperar un tesoro preciado. Se sabe que esta sala está protegida por sensores de movimiento. Nuestro héroe se pone un par de visores. Al principio, la sala no es diferente. El humo se esparce en el ambiente. Poco a poco, una malla de rayos láser se revela. Nuestro héroe a continuación, realiza acrobacias

increíbles en los rayos láser, y llega al otro extremo de la habitación sin activar la alarma. ¿Ciencia ficción? Tal vez no.

Los visores utilizados por nuestro héroe bien puede ser infrarrojos (IR), los visores de protección IR pueden convertir la luz infrarroja invisible a la luz que puede ser vista por el ojo humano. La Figura 3.7 muestra una versión de manos libres de estos visores 6100 IR desarrolladas por Electrophysics Corporation [22].



**Figura 3.7 Visores 6100 IR de Electrophysics Corporation [22].**

La sensibilidad espectral de los visores 6100 IR es 0,4 a 1,3 micrones. La luz visible es 0,4 a 0,7 micrones. Por lo tanto, la luz normal se puede ver a través de estos visores. Esto explica por qué nuestro héroe es capaz de ver normalmente a través de los visores.

La luz próxima al infrarrojo es 0,7 a 1,5 micrones. Aunque estos visores no cubren el amplio espectro de longitudes de onda del infrarrojo cercano, será capaz de sentir un láser en el infrarrojo cercano siempre y cuando su longitud de onda esté entre 0,7 y 1,3 micras. Las longitudes de onda más utilizadas en Láser FSO son 0,80; 0,85 y 1,55 micras. Por lo tanto, los visores IR 6100 de Electrophysics Corporation son capaces de detectar láseres en el sentido de 0,80 y 0,85 micrones, por lo que no podrá detectar rayos láser a 1,55 micras.

Se deja explicado por qué nuestro héroe tuvo que usar el humo antes de que pudiera ver los rayos láser. La luz del láser es muy direccional y por lo general sólo viaja a donde es señalado. Por ejemplo, los punteros láser que se utilizan en las

presentaciones en una sala de juntas son láser visibles. Mientras que un punto brillante del laser al momento de apuntar puede ser visto, por lo general no se puede ver la luz del láser a lo largo del camino desde el puntero láser al punto brillante. Las partículas de humo genera la dispersión del haz de láser de modo que una parte del haz se dispersa hacia la calidad de observador. Para una dispersión de éxito sería necesario que el tamaño de las partículas del humo sean del mismo orden que las de la longitud de onda de la luz láser.

Por lo tanto, un enemigo puede ser capaz de detectar un vínculo FSO si utiliza visores infrarrojos. Algunos medios de dispersión del haz de láser que se necesita son: el humo, el cual puede estar presente desde la contaminación en general, o en un escenario de guerra, el humo puede provenir de los incendios. Otro de los medios para que los rayos láser sean también muy dispersos es la niebla y la neblina. Por lo tanto, un día de niebla puede ser un buen momento para detectar rayos láser.

Para reducir al mínimo la probabilidad de que un rayo láser no sea detectado al transmitir. No se debe usar una potencia excesiva. Esto reducirá la cantidad de luz dispersada y por lo tanto reducir la probabilidad de detección.

### 3.3 PROBABILIDAD DE INTERCEPTACIÓN

Interceptar una transmisión láser es la toma de la señal enviada desde el transmisor. Si bien la detección del rayo láser se puede realizar dentro o fuera del rayo, la interceptación del haz requerirá la colocación de un dispositivo de detección en el haz del láser. Las transmisiones de láser son altamente direccionales, un sensor que se base en la dispersión fuera del haz, sólo recibirá señales muy débiles, que pueden no ser suficientes para la extracción de información. Por otra parte, las dispersiones procedentes de diferentes partes del haz representan las señales de las distintas fases en el tiempo de la transmisión. Por lo tanto, señales dispersas pueden interferir unas con otras, dando como resultado el ruido.

La probabilidad de interceptación de un rayo láser incluye la probabilidad de detección desde el interior del haz y por lo tanto depende de la divergencia del haz. Sin

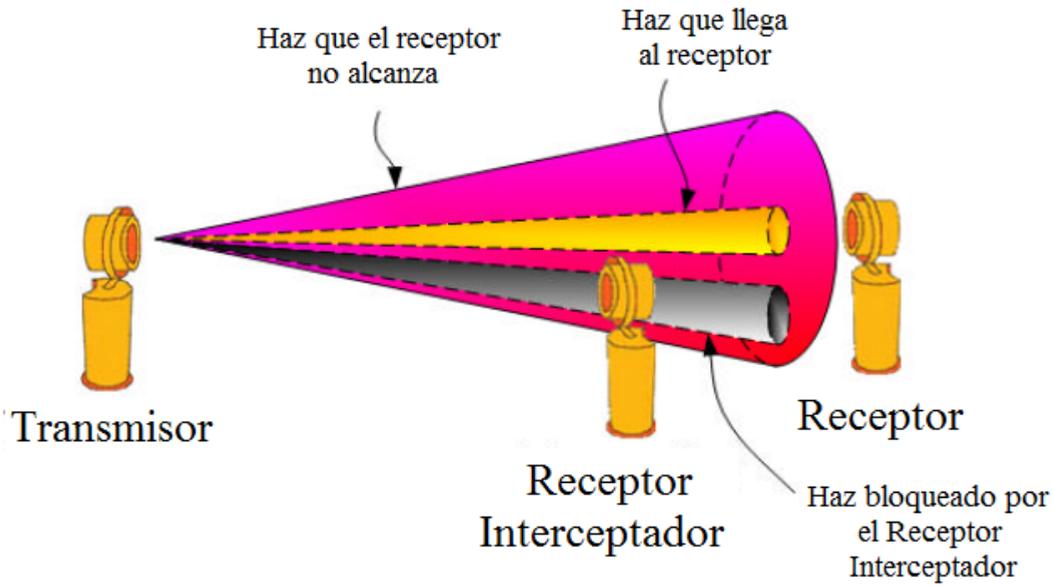
embargo, interceptar una transmisión láser por lo general tiene un requisito adicional este es que la transmisión no debe ser interrumpida. Esto se debe a que los transmisores-receptores láser por lo general tienen algún tipo de protocolo de control de flujo para asegurar que el transmisor no inunde al receptor. Si se intercepta los bloques de la transmisión de las señales láser de llegan al receptor, el receptor no dará la solicitud de más información al transmisor. Por lo tanto, la interceptación de la información sería un fracaso.

Aquí radica otro de los factores distintivos entre RF y FSO "Las Antenas". Las antenas de RF por lo general consisten en una serie de guías de onda que se utilizan para detectar las transmisiones RF. Si bien una parte de la transmisión se convierte en electricidad, gran parte de la señal transmitida pasa entre las guías de onda sin cambios. Las "Antenas" en FSO por otra parte suelen consistir en una lente que concentra toda la luz que cae sobre la lente en un detector que puede convertir la señal en forma eléctrica. Por lo tanto, las señales que se encuentran en el detector serían totalmente bloqueadas desde el receptor y la interceptación de información adicional puede fallar.

Interceptar una transmisión láser es difícil de lograr sin interrumpir la misma. Esto se explica por la divergencia pequeña del haz del rayo. Dado que la mayoría de la señal cae dentro del receptor, bloqueando parte del rayo no implicaría una cantidad significativa de energía que alcance el receptor previsto. Aún si la energía suficiente alcanza el receptor previsto de tal forma que todavía es capaz de interpretar los datos, la inteligencia puede ser integrada en el receptor de tal manera que sepa que una caída repentina en la potencia de recepción es causa de una interceptación.

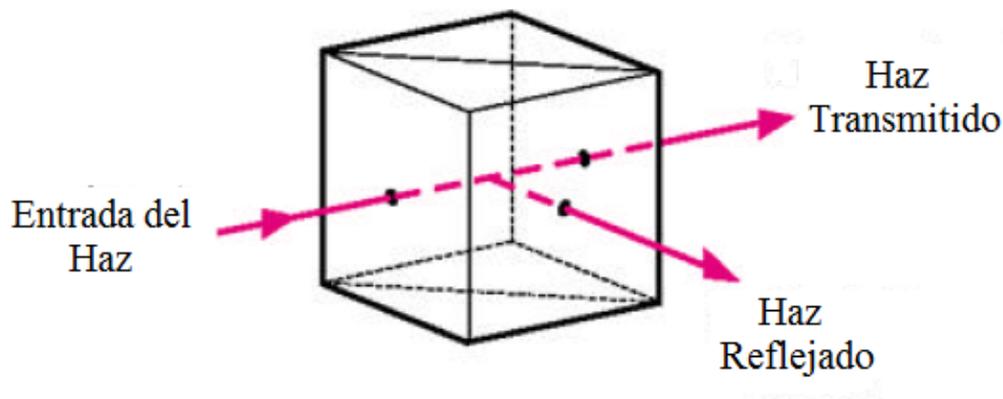
Mientras que interceptar un rayo láser generalmente interrumpe la transmisión, este no puede ser el caso de los enlaces de larga distancia. En un típico haz FSO de 0,5 mili radianes se amplía el diámetro del círculo hasta 10 metros después de recorrer 20 km. El tamaño de la óptica de una Receptor FSO por lo general tiene un diámetro de no más de 3 metros. Por lo tanto, no es oportunidad suficiente para un receptor de interceptación aprovechar la señal transmitida sin interrumpir la señal del receptor previsto.

Desde la perspectiva de la seguridad, tiene sentido tener un haz con un pequeño ángulo de divergencia como sea posible. Sin embargo, esto también significa dificultad en la colocación del haz, especialmente para los enlaces de larga distancia. Por lo tanto, muchos sistemas FSO están diseñados para que no todo el rayo se inscriba en la óptica del receptor.



**Figura 3.8 Intercepción de una Transmisión Láser de Largo Alcance**

Incluso si todo el haz de transmisión se centra en el receptor, aún es posible apuntar a la señal sin el bloqueo de la transmisión. Una forma es a través del uso de divisores de haz.



**Figura 3.9 Cubo Divisor de Haz**

La Figura 3.9., muestra un cubo divisor de haz de 45° que permite que una cierta porción del haz de entrada pase a través de cambios, mientras que la otra parte del haz se refleje en 90°. La intensidad de la transmisión y haces reflejados suma igual al de la entrada del haz. La intensidad relativa de los haces reflejados y transmitidos (conocido como el R / T relación) es típicamente 50:50. Es decir, tanto los rayos reflejados y transmitidos son de la mitad del poder del haz de la entrada.

Mientras que el cubo divisor de haz anterior permitía que una cierta porción del haz de entrada pase a través de él, el haz recibido debe ser de suficiente energía para el receptor. Por otra parte, si el receptor es capaz de detectar la reducción repentina en la potencia, este puede plantear una alarma que indique que la transmisión ha sido interceptada.

En resumen, para reducir la probabilidad de interceptación de una transmisión de láser, la divergencia del haz no debe ser superior a lo necesario. Además, sería bueno si el receptor es capaz de levantar una alarma si hay una interrupción inesperada o una reducción de la potencia del haz láser recibido.

### 3.4 RELACIÓN SEGURIDAD ÓPTICA Y RADIOELÉCTRICA

La seguridad de la red es una de las preocupaciones principales por cualquier negocio u organización en la cual su información sensible y confidencial viaje a través de ella. Para los usuarios de la tecnología de FSO, la seguridad puede ser una preocupación porque la tecnología utiliza láser para la transmisión.

Con sus calidades provechosas y de ancho de banda, los productos sin los estándares ópticos que trabajan en la gama de la longitud de onda infrarroja cercana son una tecnología alternativa del transporte para interconectar los segmentos del establecimiento de una red de Alta capacidad.

La opinión común de la radio es que ofrece menos seguridad que conexiones del wireline. De hecho, la óptica libre del espacio (FSO) es más segura que el RF u otras tecnologías sin hilos-basadas de la transmisión por varias razones:

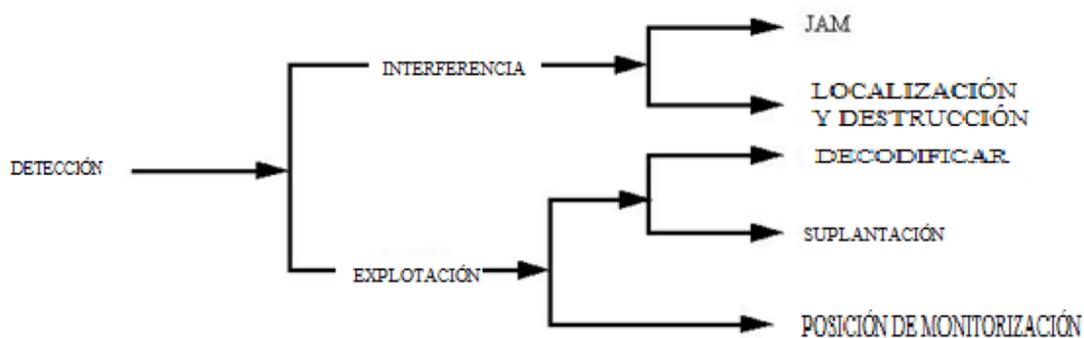
- Los rayos laser de la óptica del espacio libres (FSO) no se pueden detectar con los analizadores de espectro o los metros del RF.
- Las transmisiones del laser de la óptica del espacio libres (FSO) son ópticas y recorrido a lo largo de una línea de la trayectoria de la vista que no se pueda interceptar fácilmente. Requiere un transmisor-receptor de la óptica del espacio libres que empareja (FSO) alineado cuidadosamente para terminar la transmisión. La interceptación es muy difícil y extremadamente inverosímil.
- Los rayos laser generados por los sistemas ópticos en el espacio libre (FSO) son estrechos e invisibles, haciéndolos más duros encontrar e igualar más difícilmente para interceptar y para agrietarse.
- Los datos pueden ser excedente transmitido a la conexión cifrada que agrega al grado de seguridad disponible en transmisiones de la red de la óptica del espacio libres (FSO).

Una de las razones principales de esta preocupación se basa en el hecho de que las soluciones sin los hilos de rosca del establecimiento de una red son una categoría en la cual los problemas de la seguridad y de la interferencia son muy comunes en la radiofrecuencia (RF) o sistemas microonda-basados de la comunicación. Tales preocupaciones son inválidas para los sistemas sin estándares ópticos. Los sistemas sin estándares ópticos trabajan levemente en la gama de la longitud de onda infrarroja cercana en el fantasma visible. Por lo tanto, el ojo humano no puede ver visiblemente la viga de la transmisión.

El uso y la seguridad apropiados de láser se han discutido desde que los primeros dispositivos de FSO aparecieron en laboratorios hace más de tres décadas. Las dos preocupaciones principales implican la exposición del ojo a los rayos de luz y a los altos voltajes dentro de los sistemas ligeros y de sus fuentes de alimentación. Estrictos estándares internacionales se han fijado para la seguridad y el funcionamiento de estos sistemas sin hilos ópticos.

El éxito de las Fuerzas Armadas modernas depende en gran medida de la utilización eficaz de las comunicaciones por radios sofisticadas y sistemas de

navegación. Históricamente, el enemigo ha empleado contramedidas electrónicas (ECM) para detectar la presencia de estas señales de radio para bien alterarlas y/o hacer uso de ellas. Los sistemas de radio pueden ser interrumpidos por interferencias o mediante su localización y destrucción. Por otro lado, la explotación implica el uso de las transmisiones para los propósitos de inteligencia y contrainteligencia. Antes del desarrollo de alta calidad en la seguridad de datos y de técnicas de seguridad en la transmisión, fue posible reunir información de inteligencia en base a las señales recibidas por ellos para demodular y decodificar (descifrar). Para los sistemas simples, también es posible la "suplantación" (spoof) que proporcionen falsas informaciones (contra-inteligencia). Las transmisiones de Radio también pueden ser explotadas, incluso cuando se emplean técnicas de alta calidad de seguridad, encontrando la dirección de radio (RDF) o su localización. Un escenario de estas técnicas básicas de ECM se muestra en la Figura 3.10.



**FIGURA 3.10 Guerra Electrónica General de Sistemas Militares [23]**

Varios conceptos se han desarrollado para hacer frente a estas técnicas de ECM. Estas han sido llamadas las Contra Contra Medidas Electrónicas o ECCM. La Baja Probabilidad de Detección (LPD) se ocupa de la prevención de que los enemigos puedan detectar una transmisión. Baja Probabilidad de Intercepción (LPI) se ocupa de prevenir que el enemigo intercepte o se meta en la transmisión. Baja Probabilidad de Explotación (LPE) se refiere a prevención de la explotación de la señal mediante la decodificación, suplantación de identidad, o la localización. La LPE está diseñada para negar al enemigo el conocimiento del sistema, su modulación, características, su uso y

sus usuarios. Anti-Jamming (AJ) es la prevención de una negación del servicio (DoS) por las señales de ruido enviadas por el enemigo desde una plataforma.

En esta sección se verá todos estos conceptos, y cómo la tecnología FSO se realiza en cada uno de ellos.

### 3.4.1 Negación de Servicio

Lo último de las contra medidas electrónicas es la prevención de la negación del servicio de ataque. En las CCME, la negación de servicio en gran parte se refiere a las interferencias. Jamming es el envío de una señal de interferencia a un receptor, de manera que el receptor ya no es capaz de realizar su función debido a una disminución de la relación señal / ruido. Si bien los intentos de interferencia para aumentar el nivel de ruido en el receptor son muchos, otra manera de disminuir la relación señal / ruido es la disminución de la señal que llega al receptor. El hecho de que los enlaces FSO son inherentemente enlaces en línea de vista a causa de los láseres utilizados, esto implica que es posible bloquear los rayos láser que llegan a sus receptores previstos. La negación de servicio también incluye la probabilidad de destruir el sistema de comunicaciones adversario. Este inciso final echa un vistazo a que puede haber un equivalente a la alta velocidad de lucha contra los Misiles de Radiación (HARM) que son capaces de bloquear y destruir las antenas comunicación RF.

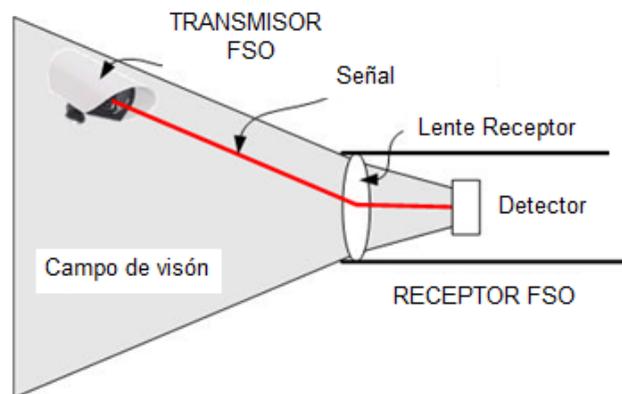
#### a. Jamming

Es el desafío de los receptores de la comunicación para extraer la señal de transmisión de las señales de ruido no deseado. Entonces es natural que si un adversario quiere interrumpir las comunicaciones, puede introducir "ruido" al receptor de tal manera que ya no es capaz de distinguir la señal deseada del ruido.

Filtros pasa banda son utilizados en la mayoría de los receptores de la comunicación para rechazar el ruido no deseado, también puede ser eficaz contra el bloqueo. Como los sistemas FSO normalmente sólo utilizan una sola frecuencia, cualquier otra frecuencia recibida debe ser descartada como ruido. Esto presenta dificultades para la emisión del que necesita saber la frecuencia en uso. El envío de

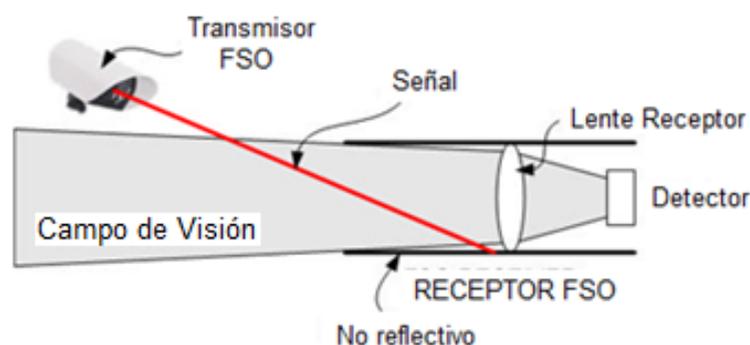
señales de interferencia en otras frecuencias sería simplemente descartado por el receptor.

Si el jammer sabe la frecuencia de uso, un método simple de reducir la probabilidad de interferencia por el jammer es reducir el campo de visión del receptor (a veces llamado el ámbito de la relación).



**Figura 3.11 Receptor FSO con un amplio campo de visión**

La Figura 3.11., muestra un receptor FSO con un amplio campo de visión (FOV). Hay más oportunidades para que una plataforma pueda enviar su señal de interferencia al receptor. La señal de interferencia se centró en el detector del receptor FSO por la lente del receptor.



**Figura 3.12 Receptor FSO con un estrecho campo de visión**

Como se muestra en la Figura 3.12., si la lente y el detector están empotrados en la cavidad del receptor, se produce un campo mucho más estrecho de visión. Una plataforma en este campo de visión no podrá interferir la señal del receptor ya que su bloqueo no entra en el receptor. Las cifras típicas de campo de visión son de décimas de grados hasta 15 grados o incluso más en algunos casos [24]. Un campo de visión más pequeño es más resistente a las interferencias. Sin embargo, un pequeño campo de visión representaría dificultad en la detección de la señal desde el transmisor legítimo. Siempre que sea posible, un campo de visión amplio se puede utilizar para establecer la comunicación, mientras que un campo de visión estrecho puede ser utilizado una vez la ubicación del emisor se ha establecido.

### **b. El Bloqueo de la Señal**

Si bien los intentos más comunes de interferencia son aumentar el nivel de ruido en el receptor, otra manera de disminuir la relación señal / ruido es la disminución de la señal que llega al receptor. El hecho de que los enlaces FSO son inherentemente enlaces realizados en línea de vista a causa de los láseres utilizados esto implica que es posible bloquear los rayos láser que lleguen a sus receptores previstos.

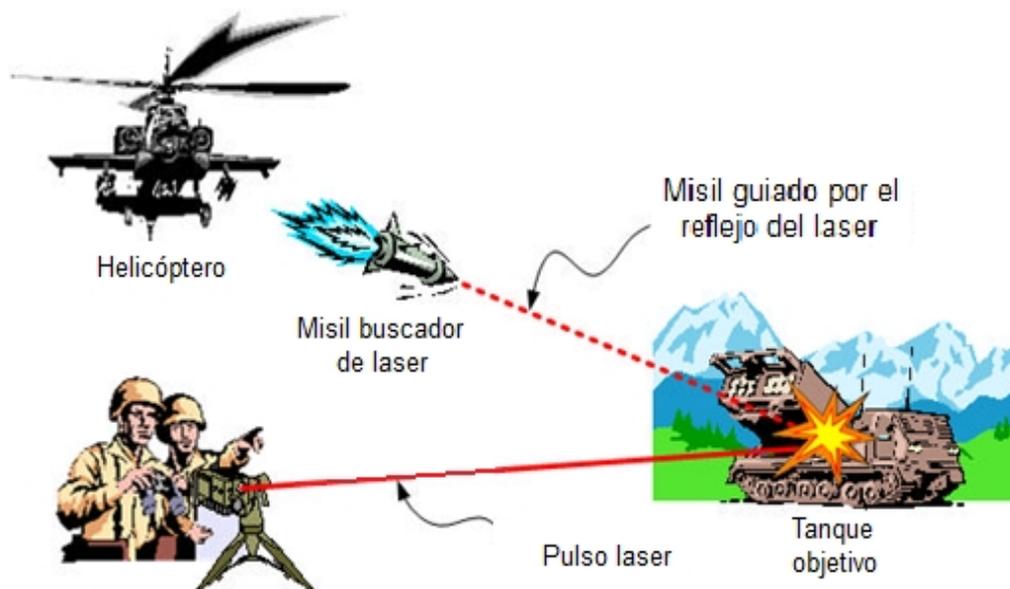
El bloqueo de la transmisión del laser puede ser tan simple como la movilización de alguna plataforma para bloquear el haz de láser. Mientras que una plataforma sólida y opaca es ideal para bloquear el haz, estratégicamente el humo de los incendios puede ser capaz de reducir lo suficiente la fuerza de la señal que llega al receptor.

### **c. La Destrucción de Transceptores**

La negación de servicio también incluye la probabilidad de destruir el sistema de comunicaciones de un adversario. Evidentemente, si un adversario conoce las coordenadas geográficas de un transmisor-receptor, un bombardeo de los depósitos podría potencialmente destruir el transceptor. Sin embargo, bombardear una posición determinada por lo general requiere cierto grado de proximidad, mientras que los misiles y otras municiones de largo alcance puede no ser lo suficientemente precisas para destruir un transmisor-receptor pequeño.

Los misiles de alta velocidad contra la radiación como el HARM AGM-88 han sido implementados con éxito por la Fuerza de Defensa de los EE.UU. en la destrucción de sistemas enemigos equipados con radares de defensa. El HARM busca y destruye los radares mediante el bloqueo de las señales emitidas por estos radares. El HARM fue diseñado para buscar y destruir las antenas que emiten señales de radiofrecuencia, pero no para las que emiten frecuencias láser.

El misil original AGM-114 Hellfire, utilizado anteriormente en el Comanche EE.UU. y helicópteros Apache, fueron misiles en busca de láser. Un rayo láser se dirige al objetivo, y el misil es lanzado ya sea por un artillero, desde un helicóptero, o por las fuerzas de tierra. El láser tiene un patrón particular de codificación de pulsos de encendido y apagado. Antes de dar la señal de detonación, una computadora le dice al sistema de control de misiles que patrón de pulsos específicos tiene el láser. El misil tiene un buscador de láser en la nariz que detecta la luz del láser que se refleja en el objetivo. De esta manera, el misil puede "ver" donde está el objetivo. El sistema calcula la forma de guía que el misil debe llevar con el fin de dirigirse directamente a la luz del láser reflejada.



**FIGURA 3.13** Escenario de implementación de un Misil Busca Laser

---

Parecería que una combinación de las tecnologías de los misiles HARM y Hellfire daría un misil que pueda buscar y destruir un transmisor de FSO. Sin embargo, una vez más, el pequeño ángulo de divergencia de un rayo láser resulta ventajoso para FSO. El HARM busca una señal de radar que se emite a través del espacio aéreo, mientras que el Hellfire requiere un buen reflejo del rayo en el objetivo para que pueda "ver" el rayo láser.

Los transmisores FSO sólo dirigen sus rayos láser hacia el receptor. Un buscador fuera del rayo es incapaz de detectar el láser. Es poco probable que los misiles sean capaces de "detectar" un rayo láser estrecho hacia el transmisor, debido a las inestabilidades de vuelo. Un ligero cambio en la posición de los misiles podría causar que se pierda la señal láser y por lo tanto la posición de su objetivo. Por otra parte, una ruptura en la transmisión desde el transmisor también causaría que el misil pierda su objetivo.

## CAPÍTULO 4

# PROPUESTA DE DISEÑO DE UN ENLACE MEDIANTE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA (FSO) EN EL ESPACIO LIBRE

### 4.1 ENLACE ÓPTICO FSO

#### 4.1.1 INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO

Al pensar en una tecnología que ofrezca el rendimiento de procesamiento full-dúplex de Giga bit Ethernet; que no requiere licencia de instalación y que se puede instalar en menos que un día que a su vez ofrece una rápida y alta tasa de transmisión de información; esa tecnología es la óptica del libre-espacio (FSO).

El proceso de realizar la transmisión de datos, voz o imágenes a través de láser, utilizando banda ancha y sin necesidad de levantar calles para cablear actualmente no se trata de una idea futurista o de ciencia-ficción sino de toda una realidad concebida y materializada en Free-Space Optics (FSO), o Espacio Óptico Libre una tecnología de reciente creación, que permite transmitir información a través de redes ópticas inalámbricas. Una nueva revolución que, se fortalecerá durante los próximos años, marcando un nuevo hito en la historia de las telecomunicaciones.

La transmisión de señales a través de FSO es lo que representa una alternativa a otras formas de conexión de capa física, transparente al protocolo y ancho de banda; pues a diferencia de lo que ocurre en transmisiones de radio o microondas, en las

comunicaciones Ópticas Exteriores (FSO: Free Space Optics) utilizan la luz a través del aire como medio de transmisión. Transmiten una longitud de onda entorno a 785nm. Esta longitud de onda no requiere licencia, eliminando la necesidad de su obtención o bien los costos de las líneas arrendadas Este acercamiento de la tecnología de la línea de mira utiliza haces de luz invisibles para proporcionar conexiones ópticas de banda ancha.

Es capaz de enviar hasta 1,25 Gbps de datos, de voz, y de las comunicaciones video simultáneamente a través del aire permitiendo conectividad fibra óptica sin requerir el cable fibra óptica físico. Permite comunicaciones ópticas a la velocidad de la luz.

La tecnología de FSO requiere la luz. El uso de la luz es un concepto simple similar a transmisiones de los cables fibra óptica; la única diferencia es el medio. La luz viaja a través del aire más rápidamente que a través del cristal, así que es justo clasificar la tecnología de FSO como comunicaciones ópticas a la velocidad de la luz.

Un enlace FSO puede utilizarse en conjunto con multiplexores para el traspaso de tramas de voz, datos y video de forma simultánea. Dependiendo del tipo de servicios que se vayan a ampliar, la conexión al receptor se proporciona sobre cobre (para interfaces como E1, Ethernet o Fast Ethernet) o sobre fibra óptica (para servicios como ATM o SDH).

### **Cómo trabaja**

La tecnología de FSO es asombrosamente simple. Se ha basado en la conectividad entre las unidades sin fibra óptica, cada uno consiste en un transmisor-receptor óptico con capacidad (bidireccional) full-dúplex. Cada unidad óptica sin hilos utiliza una fuente óptica, más una lente o un telescopio que transmita la luz a través de la atmósfera a otra lente que recibe la información. En este punto, la lente o el telescopio de recepción conecta con un receptor de la alto-sensibilidad vía fibra óptica.

FSO, permite el acceso e interconexión de usuarios, pudiéndose realizar intercambio de información de voz y datos digitalizados con excelente velocidad y un

ancho de banda considerablemente grande a través de una infraestructura de red integrada y un conjunto de plataformas de interconexión a otras redes.

En esta tecnología los sistemas operan al tomar una señal estándar de datos o telecomunicaciones para convertirla a formato digital y después enviarla a través del espacio libre. El transporte utilizado para la transmisión de esta señal es la luz infrarroja, generada por LEDs de alta potencia o diodo(s) láser de baja potencia.

"A lo largo de 2002, la óptica de espacio libre ha ocupado un lugar destacado en el sector de las telecomunicaciones, con un importante crecimiento mundial e indicadores claros de que desempeñará un papel cada vez más relevante en tres segmentos de la industria de redes: líneas fijas, comunicaciones inalámbricas y comunicaciones empresariales", ha asegurado Bettina Tratz-Ryan, analista sénior de Gartner Dataquest. "El número de operadoras que están evaluando o instalando este tipo de sistemas aumenta constantemente y, con ellas, su adopción dentro del mercado"

#### **4.1.1.1 Parámetros involucrados en la tecnología**

El desempeño y funcionalidad de un enlace FSO va a depender de diferentes características del equipo utilizado. A continuación se presentan los principales parámetros que se deben de tomar en cuenta en un equipo FSO.

##### **4.1.1.1.1 Interfaz aérea (FSO)**

###### **a) Clasificación del Láser**

Esta clasificación indica el nivel de seguridad del transmisor. Esta va a ser determinada principalmente por la longitud de onda y la potencia de transmisión de cada láser. Generalmente los equipos FSO cumplen algunas de las siguientes clasificaciones:

- **Láser Clase 1M**

Transmisores láser que son completamente seguros aún cuando son vistos directamente con el ojo sin protección alguna.

- **Láser Clase 3b**

Transmisores que normalmente son peligrosos si se tiene una exposición directa con el láser.

Los equipos FSO no son visibles para el ojo humano ya que operan en una longitud de onda que es superior a los 780 nm, es por esto que FSO debe cumplir con los estándares de seguridad Clase 1M y de esta forma no causar daños a terceros.

**b) Longitud de onda**

Los equipos FSO pueden trabajar en las siguientes longitudes de onda:

- **Cercano a los 800 nm**

Esta longitud de onda se encuentra dentro del espectro conocido como "Región de Riesgo Retinal" ya que esta puede llegar a dañar la retina del ojo en caso de incidencia con el rayo. En este caso la única forma de poder tener un nivel de seguridad aceptable es transmitiendo a una potencia relativamente baja.

- **1550 nm**

Generalmente los equipos que operan en esta longitud de onda cumplen con las normas de seguridad para el ojo humano "eye-safe" ya que esta se encuentra fuera de la "Región de Riesgo Retinal". Estos equipos pueden transmitir a niveles de potencia hasta de 50 veces mayores que los que operan en 850 nm y cumplen con las normas de seguridad "eye-safe".

La potencia de transmisión es el punto medular en los sistemas FSO. Conforme más alto sea este parámetro se va a poder contar con una mayor penetración en la neblina más densa y de igual forma, se es posible contar con enlaces de longitudes mayores. Esto se va a traducir en tener un enlace con un alto nivel de disponibilidad de hasta 99.999%.

**4.1.1.2 Montaje y estabilidad del equipo**

A diferencia de los equipos de radio, FSO tiene una mayor susceptibilidad al movimiento, es por esto muy importante que tanto la plataforma como la estructura de montaje del equipo cuenten con un sistema de fijación rígido y estable. Al contar con

esto, una vez se encuentre instalado, el enlace va a funcionar de excelente manera sin necesidad de realizar posteriormente reajustes en la alineación.

Es por esto que se recomienda la instalación de los equipos en:

- Mástiles en azoteas o paredes
- Mástiles detrás de ventanas
- Torres auto soportadas

#### 4.1.1.2.1 Interfaz física

Ya que FSO únicamente trabaja en la capa física del enlace, esta es transparente al tipo de información transmitida en donde esta puede ser PDH, SDH, IP, ATM, etc.

Los equipos FSO entregan una interfaz física la cual es una fibra óptica y esta es conectada al equipo terminal. Las características de la interfaz física pueden variar dependiendo del modelo.

Gracias a esto generalmente pueden ser usados en FSO los mismos modelos de equipos terminales que se usan cuando comúnmente se instala una fibra óptica.

Inclusive, es posible extender un largo trayecto de fibra hasta de 2 Km a partir del equipo FSO sin necesidad de instalar repetidores.

#### Características de los sistemas FSO

- Las características de los sistemas FSO serán evaluadas a través del “balance de potencia”
  - Para garantizar el BER específico, el balance de potencia no puede ser negativo.
  - Pérdidas asociadas al enlace óptico:
  - Perdida por desapuntamiento,
  - Pérdidas ópticas en el receptor,

- Pérdidas por el aumento del diámetro del haz de láser,
  - Efectos atmosféricos (atenuación y cintilación).
- 
- Las pérdidas por desapuntamiento y las pérdidas ópticas en el receptor son independientes de la longitud del enlace.
  - Las pérdidas por el aumento del diámetro del haz, atenuación atmosférica y cintilación limitan la longitud del enlace y pueden reducir severamente la disponibilidad del sistema.
  - Las pérdidas por el aumento del diámetro del haz serán tan grandes cuanto menor sea el área del receptor.
  - El fenómeno de la cintilación se caracteriza por fluctuaciones espaciales y temporales en la intensidad de la señal recibida.
  - La pérdida por cintilación puede ser reducida con la utilización de múltiples haces transmisores y el aumento del área del receptor.
  - En las longitudes de onda de interés (entre 780nm y 1550nm), la atenuación por absorción molecular o de aerosol es despreciable.
  - El coeficiente de atenuación es dominado por la dispersión de Mie que, a su vez, es función de la visibilidad.
  - Visibilidad es técnicamente definida como la distancia en la cual la intensidad de la luz decrece a 2% de su valor inicial.
  - Cualitativamente, visibilidad es la máxima distancia en la cual aún es posible distinguir un objeto oscuro contra el horizonte.

#### 4.1.1.3 Influencia del medio ambiente en la propagación

Los enlaces FSO envuelven fenómenos como la transmisión, absorción y dispersión de la luz a través de la atmósfera. La atmósfera interactúa con la luz, debido a la composición de la misma, que en condiciones normales, se compone de una variedad de diferentes moléculas y pequeñas partículas suspendidas denominadas aerosoles.

Los fenómenos ópticos que se consideran son la absorción, dispersión y cintilación; además de prestar atención a la composición de la atmósfera.

#### **4.1.1.3.1 Absorción atmosférica**

Resulta de la interacción entre los fotones de radiación y los átomos o moléculas del medio de transmisión, esta interacción conlleva a la desaparición de los fotones incidentes. La absorción atmosférica no tiene grandes efectos sobre los sistemas FSO.

#### **4.1.1.3.2 Dispersión atmosférica**

Resulta de la interacción de una parte de la luz con los átomos y/o moléculas en el medio de propagación, lo que causa una redistribución angular de parte de la radiación con o sin modificación de la longitud de onda. De esta manera la dispersión atmosférica es función de la longitud de onda de la radiación y del tamaño (diámetro) de las partículas presentes en la atmósfera. Hay dos tipos principales de dispersión atmosférica la dispersión de Rayleigh y dispersión de Mie.

##### **4.1.1.3.2.1 Dispersión Rayleigh**

Ocurre cuando las partículas que provocan la dispersión tienen un diámetro más pequeño que la longitud de onda de la radiación. Este tipo de dispersión es responsable del color azul del cielo.

##### **4.1.1.3.2.2 Dispersión Mie**

Ocurre cuando las partículas que provocan la dispersión tienen el diámetro igual o mayor que la longitud de onda de la radiación. Este tipo es responsable por el color blanco de las nubes.

#### **4.1.1.3.3 Cintilación atmosférica**

Representa las fluctuaciones rápidas y de pequeña escala en el índice de refracción de la atmósfera que ocurre debido a la turbulencia atmosférica.

Como consecuencia, ocurren pequeñas variaciones en los tiempos de llegada de los diversos componentes del frente de onda del haz del láser; el efecto final de la

cintilación es una fluctuación temporal de la intensidad del haz del láser en el receptor. Fluctuaciones de intensidad semejantes al “parpadeo” de una estrella.

#### 4.1.1.3.4 Atmósfera de la Tierra

En FSO es de interés especial la tropósfera<sup>1</sup> porque es ahí donde ocurren la mayoría de fenómenos climáticos. La propagación de la luz en la troposfera se ve afectada por las siguientes consideraciones:

- La composición del gas en la atmósfera
- La presencia de aerosoles<sup>2</sup>
- Lluvia, nieve, granizo
- Polvo, humo, arena

##### 4.1.1.3.4.1 Composición atmosférica

Los componentes de los gases en la atmósfera se clasifican en dos categorías:

- Componentes con densidad fija, estos tienen una distribución casi uniforme en alturas comprendidas entre los 15 y 20 km. Aquí se encuentran el nitrógeno, oxígeno, argón y dióxido de carbono. En la región visible y del infrarrojo, sobre longitudes de onda de 15um el dióxido de carbono es el principal elemento que provoca absorción
- Componentes de densidad variable, son la minoría, y su concentración depende de la ubicación geográfica (latitud, altitud) y de las condiciones ambientales

---

<sup>1</sup> La tropósfera es la primera capa de la atmósfera, llega hasta un límite superior situado a 9km de altura en los polos y los 18km en la línea ecuatorial.

<sup>2</sup> Los aerosoles son pequeñas partículas sólidas o líquidas de longitud variable suspendidas en el aire.

El vapor de agua es la principal variable que constituye la atmósfera. Su concentración depende de parámetros climáticos y meteorológicos. Mientras su concentración puede llegar al 2% en ambientes a nivel del mar, su presencia es insignificante a altitudes mayores de 20 km.

Otra variable importante es el ozono, cuya concentración varía también de acuerdo a la altitud (máximo hasta 25 km), latitud y ambiente. Es un factor importante de absorción en la banda del ultravioleta, mientras que en la región del infrarrojo afecta a las longitudes de onda del orden de 0,6  $\mu\text{m}$ .

#### 4.1.1.3.4.2 Aerosoles

Son partículas extremadamente finas (sólidas o líquidas) suspendidas en la atmósfera debido a su tamaño tienen una velocidad de atracción a la tierra muy pequeña. Su tamaño oscila entre 0,01  $\mu\text{m}$  y 100  $\mu\text{m}$  de diámetro; por la atracción gravitacional, las partículas más grandes (mayor a 0,2  $\mu\text{m}$ ) se encuentra cerca del suelo.

La niebla es un aerosol líquido, mientras que la arena es un aerosol sólido.

La presencia de aerosoles causa varios disturbios en la propagación de ondas ópticas a medida que su dimensión se acerca a las longitudes de onda de propagación.

El evento atmosférico que más afecta a los sistemas FSO es la neblina, debido a la relación entre el diámetro de las partículas y la longitud de onda. Esto porque la neblina está constituida por partículas de agua que son tan densas y pequeñas que funcionan como prismas, distorsionando y atenuando la señal óptica.

## 4.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA RED DE LA ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

Como antecedentes se debe mencionar que la red de la ESPE fue implementada en el año de 2004, la misma que para la interconexión de los Departamentos siguió una topología en anillo de fibra óptica utilizando la tecnología FDDI (Fiber Distributed Data

Interface – Interfaz de Datos Distribuidos sobre Fibra), como se muestra en la Figura 4.1.

En cada edificio de la ESPE se tienen redes, subredes y equipos que gestionan el funcionamiento de las mismas, mediante el levantamiento realizado se pretende conocer la conexión de Switches y la manera como se enlazan las dependencias para luego poder realizar el diseño del enlace inalámbrico óptico FSO. De acuerdo a la información obtenida de las distintas dependencias y sobre todo de la UTIC se ha determinado el diagrama de conexión de la red de la Escuela Politécnica, la misma que se muestra en la Figura 4.2. De acuerdo a este esquema se distinguen tres niveles de operación de los dispositivos de conectividad.

- En un primer nivel se encuentran los switches llamados de NÚCLEO (*CORE*), ubicados en los edificios de Administración; estos switches son el corazón de la red de la Escuela puesto que son los nodos principales de la misma, gestionan gran parte de la comunicación e interconectan todos los puntos de red.
- En un segundo nivel, tenemos los switches de *DISTRIBUCIÓN*, que se encuentran ubicados según lo indica la Figura en cada una de las dependencias y edificios que se encuentran en la red interna. Al igual que los anteriores los switches de distribución son responsables de conectar a su vez a otras dependencias de la red siguiendo la topología de estrella extendida.
- Las dependencias que se derivan de estos switches de distribución nos llevan hacia el siguiente nivel que es el de acceso. Aquí se encuentran funcionando los denominados switches de *ACCESO* que son los puntos finales de conexión dentro de la red (nivel tres) y que se ubican generalmente en dependencias distintas (otros edificios), pero también los hay dentro de los mismos edificios o facultades, siendo en estos casos los laboratorios o centros de investigación los destinos finales.



Figura 4.1 Cableado de Fibra Óptica en la Escuela Politécnica del Ejército<sup>18</sup>

<sup>3</sup> Figura tomada de los archivos de las UTIC.

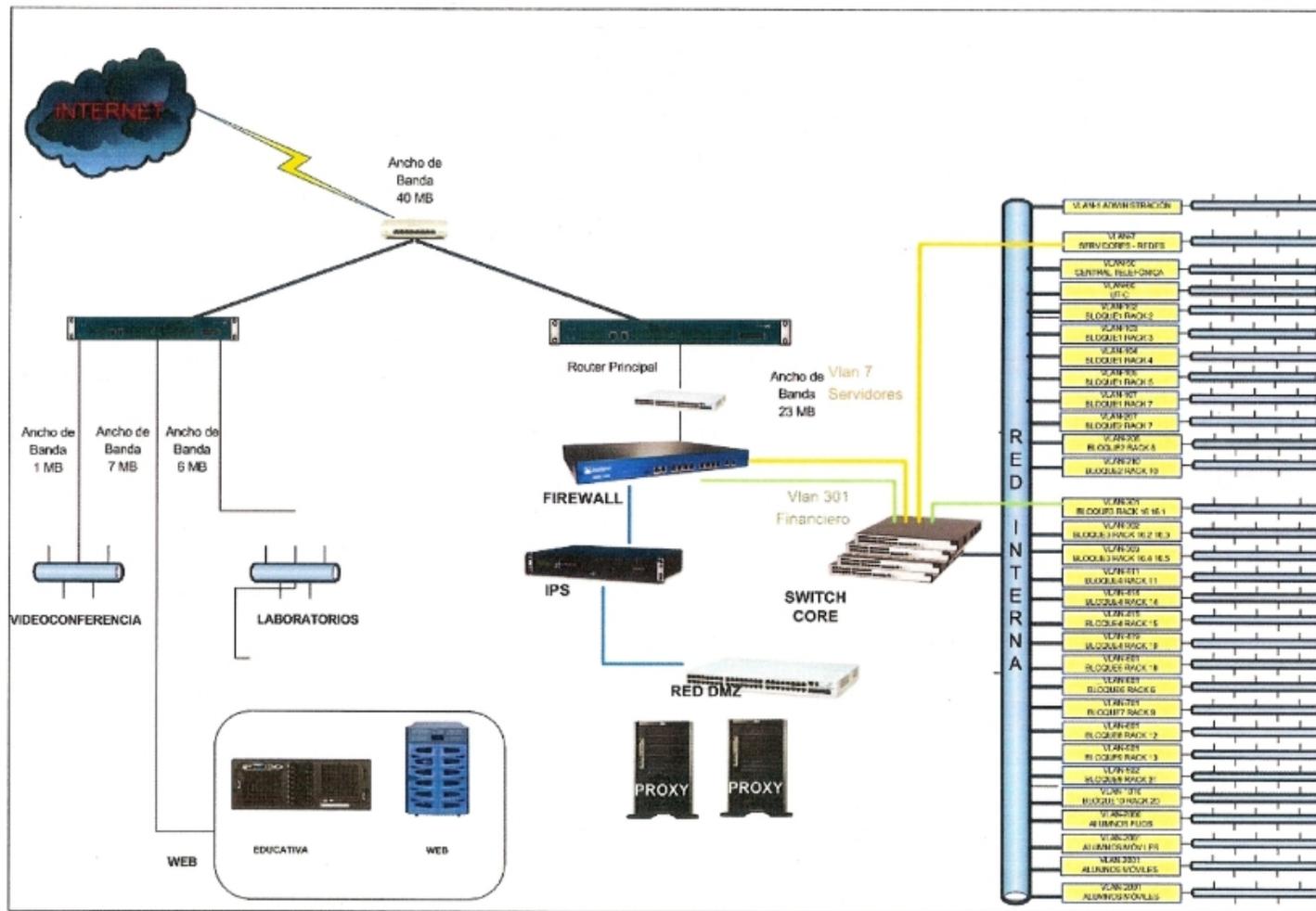


Figura 4.2 Diseño Lógico de la Red Interna de la Escuela Politécnica del Ejército

<sup>4</sup> Figura tomada de los archivos de las UTIC.

### 4.2.1. Topología de Red

A lo largo del campus universitario se tiene tendida fibra óptica que enlaza las distintas facultades, estos enlaces siguen una topología en estrella extendida, las mismas comprenden los siguientes departamentos e instalaciones, que son mostrados en la tabla 4.1.

No	DISTRIBUCIÓN DE LA RED
1	Bloque de aulas A
2	Edificio de la MED
3	Edificio Administrativo
4	Residencia Universitaria
5	Edificio de Post-Grados
6	Edificio de Idiomas
7	Biblioteca
8	Laboratorios de Mecánica
9	Laboratorios de Geográfica
10	Laboratorios de Electrónica

*Tabla 4.1 Distribución de la red del campus*

La topología en estrella, consiste en muchas conexiones entre pares individuales de dispositivos, permite que la red de la ESPE sea más ágil y tenga mayor flexibilidad para cursar la información, lo cual aumenta la confiabilidad y disponibilidad de ésta.

Se distinguen un nodo hacia el cual confluyen todos los enlaces. Este nodo son los formados por dos switches de core de la Unidad de Tecnologías de la Información y Comunicación (UTIC); los mismos que se encuentran ubicados en el edificio de Administración Antiguo, formando un enlace principal denominado backbone principal, y se conectan al resto de nodos de distribución por enlaces secundarios, formando de esta manera la topología en estrella extendida.

La Figura 4.3 muestra la topología actual de la red de la ESPE.

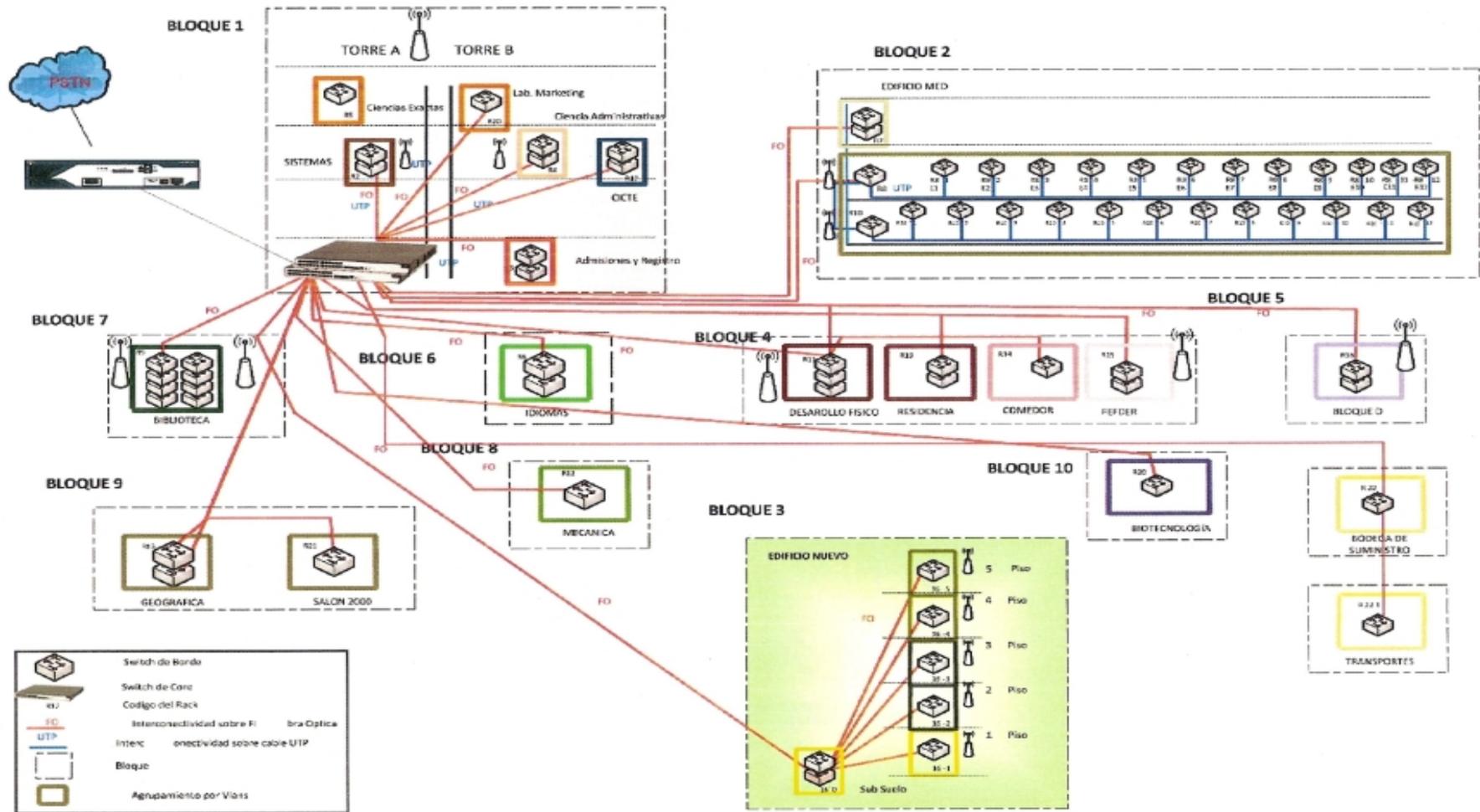


Figura 4.3 Diseño Físico de la red de la Escuela Politécnica del Ejército<sup>12</sup>

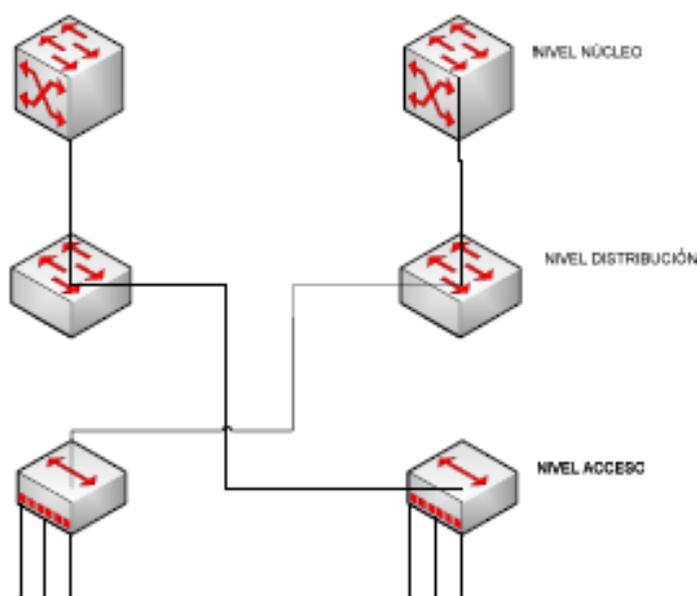
<sup>5</sup> Figura proporcionada por la Unidad Tecnológica de Información y Comunicación (UTIC).

## 4.2.2 Jerarquía de Red

La red de la ESPE es de tipo LAN Conmutada. En la red de la Escuela Politécnica del Ejército la conmutación se realiza gracias al uso de switches que siguen un modelo de diseño jerárquico.

Esto porque una red tiene mayor oportunidad de cumplir con las necesidades de su diseño, si se aplica un modelo de diseño jerárquico; donde se distingue las capas o niveles de núcleo, distribución y acceso.

La Figura 4.4 muestra los switches de conmutación y su división en los niveles de núcleo, distribución y acceso; de acuerdo a las características y funciones realizadas por cada uno.



*Figura 4.4 Niveles de Modelo Jerárquico*

La capa de Núcleo permite el transporte óptimo entre los distintos puntos de la red, la capa de Distribución brinda conectividad basadas en las políticas de conmutación que defina el administrador de la red y la capa de Acceso proporciona a los usuarios acceso a la red.

El funcionamiento de la capa de núcleo permite la segmentación de la red del campus en redes lógicas y físicas.

Los switches en la Capa de Distribución son los puntos a donde se concentran los switches de la Capa de Acceso, segmentan la red en dominios de broadcast, y donde se administran las VLANS y las Listas de Acceso; por tal razón deben ser dispositivos que puedan adecuarse al monto total del tráfico de los terminales en la Capa de Acceso y ser de alto rendimiento para que puedan manejar las políticas del tráfico.

Por estas razones los switches que operan en la Capa de Distribución deben poder operar tanto en la Capa 2 como en la Capa 3 del modelo OSI, característica que les denomina dispositivos multicapa que al trabajar en ambas capas combinan las funciones de un router y un switch.

La capa de acceso constituye el punto de entrada para las estaciones de trabajo y servidores a la red. Los dispositivos utilizados en esta capa son los switches o hubs.

El uso de un hub implica:

- Compartir el ancho de bandas entre todas las estaciones y servidores conectadas al mismo
- Formar un solo segmento de red física donde puedan ocurrir colisiones entre las estaciones de trabajo y servidores

El uso de un switch implica:

- El ancho de banda para cada estación o servidor es el completo del que disponga la conexión del switch
- Segmentar o dividir los dominios de colisión.

Este switch también ofrece acceso efectivo para servidores y usuarios que requieren un alto ancho de banda, esto se logra con puertos de switch adaptados para Fast Ethernet.

### 4.2.3 Situación actual de la Red Interna de los Laboratorios de Electrónica

Los Laboratorios de Electrónica se encuentran ubicados en la parte noroeste del campus de la ESPE, cuenta con dos plantas en su obra civil; en cada una de sus plantas se encuentran distribuidos los laboratorios de las diferentes asignaturas, así como las oficinas de cada uno de los docentes.

En la planta superior sector sur de los laboratorios se encuentra el cuarto de telecomunicaciones, el mismo que cuenta con la mayor parte de los equipos de conectividad, y por ello constituye el punto principal hacia el cual habrá de realizarse la comunicación inalámbrica óptica con la red de la Escuela Politécnica del Ejército.

La parte superior del edificio cuenta con una torre de 5 metros aproximadamente, con posibilidad de aumentar la altura hasta 10 metros, esta torre es muy importante para poder realizar el enlace con esta dependencia.



*Figura 4.5 Vista superior de los Laboratorios de Electrónica de la ESPE*

<sup>6</sup> Figura tomada con el software Google Earth versión 2011.

Los Laboratorios de Electrónica cuentan con un switch encargado de la conectividad de todas las máquinas que forman parte de la red propia de esta dependencia.

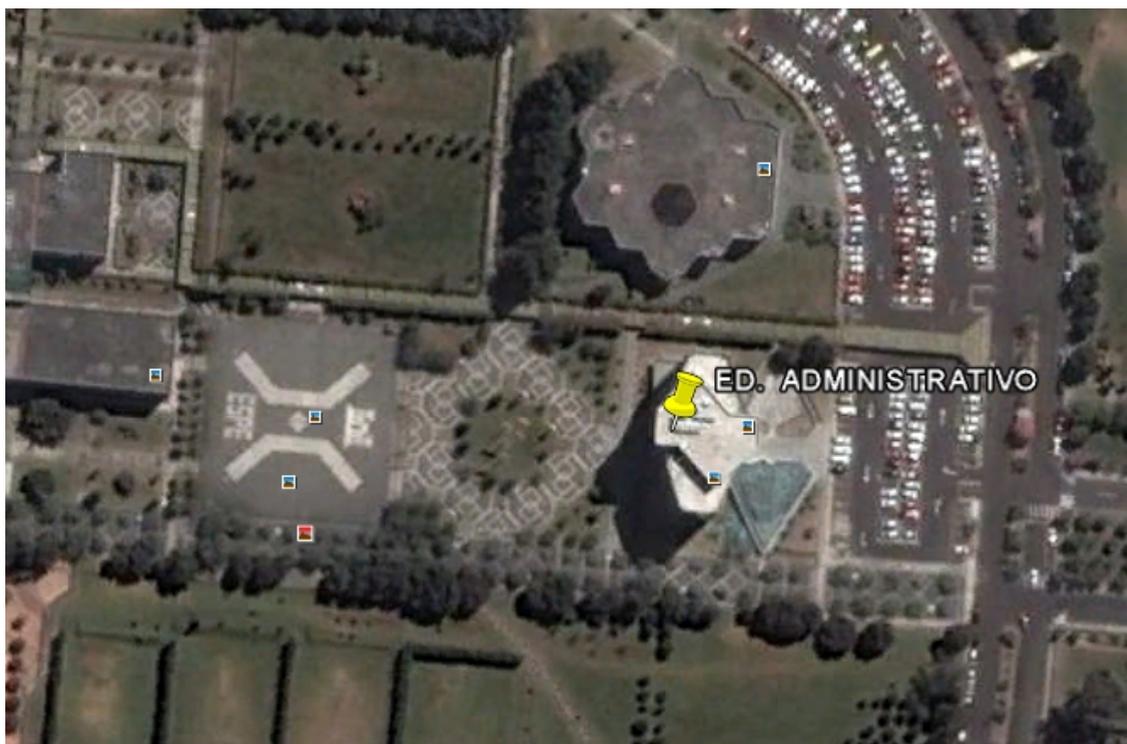
Además en esta dependencia no se dispone de equipos Access Pointe de ninguna marca en particular, en ese sentido no hay ningún equipo que se encargue de brindar conexión inalámbrica a todo el grupo de máquinas ubicadas en los Laboratorios de Eléctrica y Electrónica.

#### **4.2.3 Situación actual de la Red Interna del Edificio Administrativo**

El Edificio Administrativo se encuentra ubicado en la parte ESTE del campus de la ESPE, cuenta con seis plantas en su obra civil; en cada una de sus plantas se encuentran distribuidos los diferentes departamentos administrativos, así como las oficinas de cada uno de los Vicerrectorados.

En la planta baja de este edificio se encuentra una habitación en la cual se ha constituido el cuarto de comunicaciones, el mismo que cuenta con la mayor parte de los equipos de conectividad que servirán para conectarse a la Red de la ESPE, razón por la cual constituye el punto principal hacia el cual habrá de realizarse la comunicación inalámbrica óptica, afín de poder integrar este nuevo sistema FSO a la red de la Escuela Politécnica del Ejército.

La parte superior de su sexta planta, es decir la azotea del Edificio Administrativo tiene una altura de 38 metros, la cual brinda las facilidades para la instalación de una torre o soporte para la instalación de los equipos FSO, esta torre es muy importante para poder realizar el enlace FSO con los Laboratorios de Electrónica.



***Figura 4.6 Vista superior del Edificio Administrativo de la ESPE***

<sup>7</sup> Figura tomada con el software Google Earth versión 2011.

El Edificio Administrativo cuenta con switch de distribución encargados de la conectividad de todas las máquinas que forman parte de la red de esta dependencia.

Además en esta dependencia se dispone de varios equipos Access Pointe, en ese sentido podemos darnos cuenta que estos equipos están encargados de brindar conexión inalámbrica a todo el grupo de máquinas ubicadas en cada una de las plantas de esta dependencia.

La tecnología para realizar un enlace Inalámbrico Óptico FSO (Free Space Optics - Óptica de Espacio Libre), requiere que exista la presencia de línea de vista entre los puntos a interconectar, por tal motivo se verificó que entre los edificios propuestos en el diseño dentro del campus politécnico se cumpla con dicha condición.

En lo que respecta al enlace considerado este presenta en su trayectoria un edificio que no permite establecer línea de vista entre los dos edificios a enlazar,

inconveniente que se supera con la inclusión de una torre en los Laboratorios de Electrónica, la cual únicamente se debe implementar, puesto que esta se encuentra en la azotea de los laboratorios y una viga en el edificio administrativo, las cuales permitirán el cumplimiento de la condición anteriormente mencionada.

Cabe resaltar que en el diseño del enlace inalámbrico óptico no se contempla ningún enlace con el proveedor de servicios de Internet de la ESPE.

Por más está resaltar, que el ancho de banda característico de los enlaces inalámbricos ópticos usados en la tecnología FSO permiten hasta 2,5 Gbits/s. de tráfico cursado; razón por la que no existe inconveniente alguno en la implementación de los enlaces, en cuanto respecta a cumplir la capacidad actual de los enlaces.

Además en este capítulo se detallará el diseño del enlace inalámbrico óptico que utilizando la tecnología de espacio libre FSO proporcionará redundancia para el actual enlace de los laboratorios de electrónica y Edificio Administrativo.

Empezaremos mencionando las consideraciones preliminares para el diseño del enlace inalámbrico óptico, donde presentaré los datos resumidos del tráfico medido actual y la distancia del enlace a diseñarse.

Presentaré los cálculos de los distintos parámetros que intervienen en el desarrollo del diseño del enlace. De entre estos parámetros destacan las pérdidas por trayectoria en el espacio libre, en donde la atenuación por neblina se constituye en el factor más predominante y atenuante a la hora de realizar enlaces inalámbricos ópticos a grandes distancias.

## **4.3 CONSIDERACIONES PRELIMINARES**

### **4.3.1 Requisitos de las redes de área local (LAN)**

El enlace inalámbrico óptico que brindará redundancia al enlace entre los laboratorios de electrónica y el Edificio Administrativo formarán parte de una

denominada Red de Área Local, LAN por sus siglas en ingles, ya que la máxima distancia que se debe cubrir en el enlace para este proyecto es de 318,21 metros (Distancia medida con la ayuda de un equipo de posicionamiento global GPS<sup>8</sup>,y ratificado por un telemetro, entre el Edificio Administrativo y los Laboratorios de Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército).

Esta distancia se encuentra dentro del rango característico de las Redes de Área Local<sup>9</sup>.

En general, para el diseño de este enlace FSO como parte de la red LAN de la ESPE se deben considerar requisitos, que son únicos para cada organización o escenario, para el presente caso debemos tomar en cuenta los siguientes requerimientos:

- Funcionalidad
- Escalabilidad
- Adaptabilidad
- Facilidad de administración

Funcionalidad.- significa como su nombre lo indica que el enlace FSO debe funcionar, que exista conectividad entre usuarios con tasas de transferencias y confiabilidad razonable.

Escalabilidad.- representa la capacidad del enlace, para en un futuro permitir sin problema alguno el aumento del tamaño de transmisión sin que ocurran cambios importantes en el diseño general de mismo.

---

<sup>8</sup> Información técnica del GPS en el anexo.

<sup>9</sup> Rango aproximado característico de las redes:

LAN: 10m – 1km

MAN: 1Km – 10km

WAN: >10km

Adaptabilidad.- se debe realizar el diseño del enlace considerando el desarrollo científico que día a día se genera alrededor del mundo respecto a las comunicaciones, para así no incluir elementos activos o pasivos que pudieran limitar o impedir la implementación de las futuras tecnologías.

Facilidad de administración.- como en cualquier diseño se debe considerar el monitoreo del enlace para asegurar un correcto funcionamiento del mismo.

Para el diseño del enlace inalámbrico óptico se tiene que considerar parámetros como los siguientes:

- Tráfico medido actual
- Distancias del enlace y existencia de línea de vista

#### **4.3.2 Tráfico Medido Actual**

Para diseñar e implementar por primera vez en una organización cualquiera un enlace óptico en el espacio libre FSO, se debe indagar qué clase de servicios deberá prestar el enlace, para con estos datos calcular aproximadamente el volumen de información que se cursará en el enlace; y así determinar el ancho de banda necesario que permita realizar un diseño óptimo que no eleve los costos de implementación y que a la vez satisfaga los requerimientos esperados.

Para el caso de este proyecto de titulación, se cuenta con una red ya implementada en la Escuela Politécnica del Ejército, esta red proporciona actualmente la comunicación de las distintas facultades y departamentos en la universidad.

Por esta razón, el diseño del enlace inalámbrico óptico constituirá en un enlace de respaldo o redundancia para el enlace cableado actual a los laboratorios de electrónica.

Es así, que considerando el tráfico actual cursado entre el Edificio Administrativo y los laboratorios de electrónica, datos que tienen como máximo el valor

de 1223,3 kbits/s, se debe seleccionar una tecnología de transmisión adecuada que satisfaga este requisito.

Para el caso del presente proyecto de titulación, la tecnología FSO permite velocidades de transmisión que pueden llegar hasta 2,5 Gbits/s; haciendo a esta una alternativa válida de aplicación para implementar el enlace entre las dependencias del Edificio Administrativo y los laboratorios de electrónica.

### 4.3.3 Distancia del Enlace y existencia de Línea de Vista

Dentro del campus de la Escuela Politécnica del Ejército, se realizaron mediciones con ayuda de un equipo de posicionamiento global y un telémetro para calcular distancias con el menor error posible entre los futuros nodos de interconexión inalámbricos ópticos.

Para esto se emplearon las coordenadas geográficas reportadas por el equipo GPS, cuando se tomaron las medidas desde las terrazas de las dependencias que dispondrán los equipos FSO para permitir la comunicación inalámbrica óptica.

Los valores tabulados de las coordenadas geográficas, alturas y el nivel de referencia de los edificios a interconectarse, se presentan en la tabla 4.2.

NOMBRE DEL EDIFICIO	COORDENADAS GEOGRAFICAS [grados ° minutos ´ segundos"]	ALTURA [metros]	NIVEL DE REFERENCIA [metros sobre nivel mar msn]
LABORATORIOS DE ELECTRÓNICA	S 00° 12´ 10,8" WO 78° 12´ 10,6"	5	2400 m
EDIFICIO DE POST-GRADOS	S 00° 12´ 10,8" WO 78° 12´ 10,6"	10	2405 m
EDIFICIO ADMINISTRATIVO	S 00° 12´ 10,8" WO 78° 12´ 10,6"	38	2405 m

*Tabla 4.2 Coordenadas Geográficas, Altura y Nivel*

El resumen del valor de la distancia de los edificios entre los cuales se establecerá el enlace FSO y en los cuales se encuentran los dispositivos de conectividad de la red de la ESPE, se presentan en la tabla 4.3.

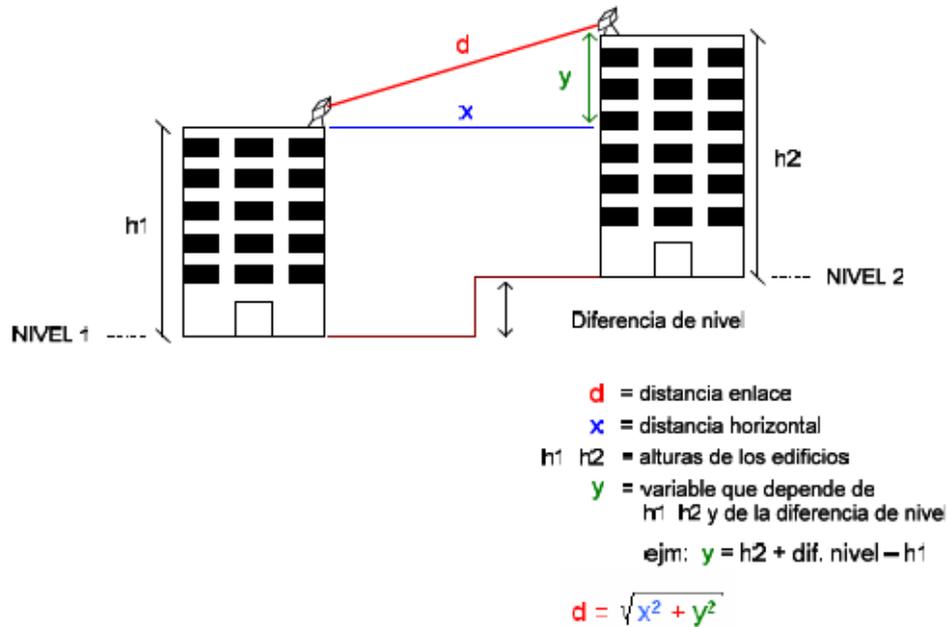
EDIFICIO ORIGEN	EDIFICIO DESTINO	DISTANCIA HORIZONTAL [m]
ED. ADMINISTRATIVO	LAB. DE ELECTRÓNICA	318,21

*Tabla 4.3 Valor de la Distancia Horizontal*

El valor de la distancia del enlace expuesto en la tabla anterior no considera el nivel topográfico de los edificios, ni las alturas de los mismos. Razón por la que el valor difiere ligeramente de la distancia real que tendrá que recorrer la señal inalámbrica óptica del transmisor y receptor de los equipos FSO.

Determinar la distancia real que recorrerá la señal inalámbrica óptica, requirió de cálculos adicionales que consideren los valores de los niveles de referencia topográficos y de las alturas de los edificios.

La Figura 4.7 muestra de forma esquemática un enlace inalámbrico óptico entre dos sitios. Se muestra detalles como la diferencia de nivel topográfico, las alturas de los edificios, la distancia horizontal y la distancia del enlace.



**Figura 4.7 Ejemplo de cálculo de las distancias de los enlaces inalámbricos ópticos**

La distancia ( $d$ ) es la que el haz lumínico recorrerá para transmitir la información de un sitio a otro. Distancia que será calculada de acuerdo a las consideraciones mostradas en la Figura 4.7 y que se detallan posteriormente.

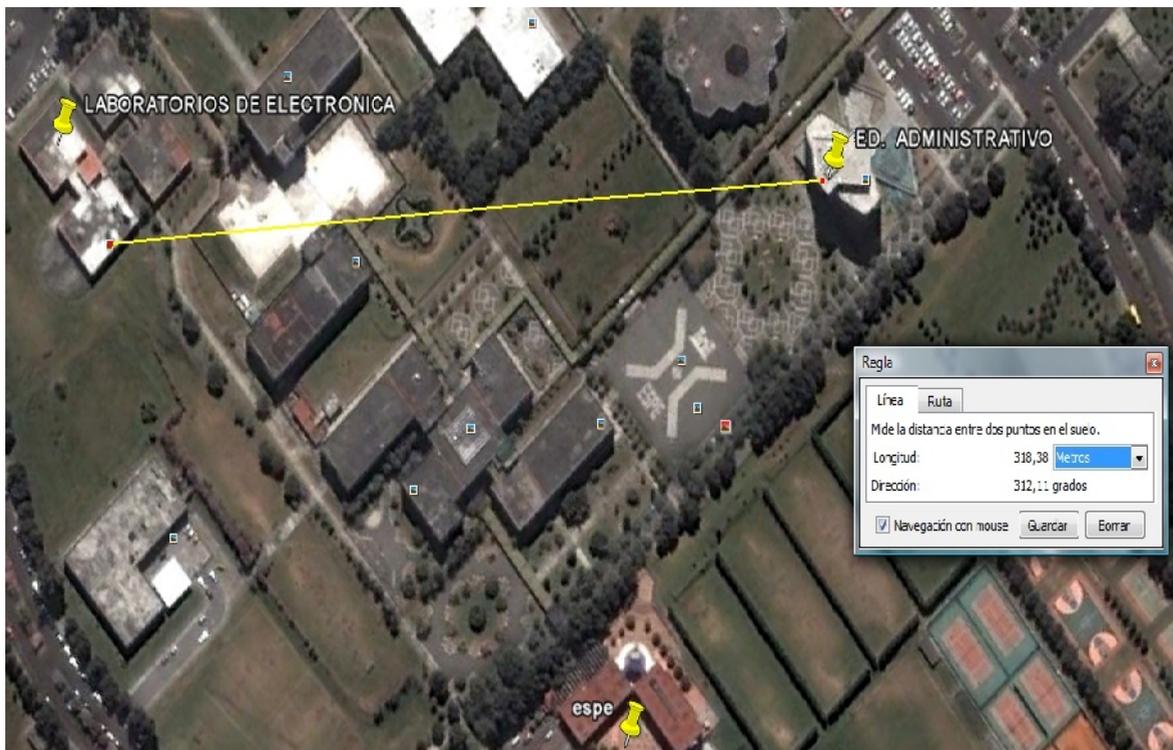
#### 4.3.3.1 Cálculo de las Distancias de los Enlaces Inalámbricos Ópticos

##### 4.3.3.1.1 Enlace Edificio Administrativo y Laboratorios de Electrónica

Este enlace tiene la particularidad de no presentar línea de vista entre ambos puntos, entendiéndose a un enlace con línea de vista como un camino limpio, sin obstrucciones físicas entre el transmisor y receptor.

Por tal razón se ha procedido a realizar el diseño de este enlace teniendo en cuenta la necesidad de incorporar una torre en los Laboratorios de Electrónica, para así de esta manera cumplir con el requisito de línea de vista que necesita todo enlace FSO.

En la Figura 4.8 se puede observar la ubicación de los Laboratorios de Electrónica y el Edificio Administrativo de la ESPE.



**Figura 4.8** Imagen de los Laboratorios de Electrónica y el Edificio Administrativo (ESPE)<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Fuente software Google Earth 2011.

La altura de la torre y sus dimensiones han sido consideradas bajo la premisa de garantizar línea de vista entre los nodos a interconectarse, y dar un correcto mantenimiento y soporte del equipo FSO, así como de optimizar los recursos que existen en los Laboratorios de Electrónica.

En la Figura 4.9 se puede observar que no existe línea de vista para con los Laboratorios de Electrónica, teniendo como punto de observación la terraza del Edificio Administrativo de la ESPE; se puede apreciar la obstrucción que genera el Edificio de Post-gradados de la ESPE.

Es por esta razón, que se ha considerado la altura de la torre en relación con la altura del edificio que causa la obstrucción.



*Figura 4.9 Imagen tomada desde la terraza del Edificio Administrativo de la ESPE*

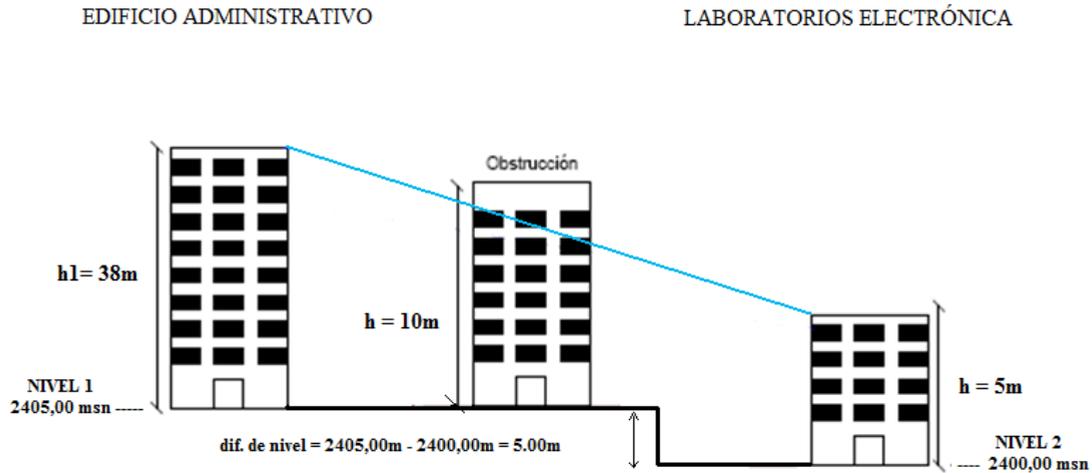
Los datos son:

	ALTURA[m]	NIVEL [msn]
<b>Edificio Administrativo</b>	38,00	2405,00

	ALTURA[m]	NIVEL [msn]
<b>Laboratorios de Electrónica</b>	5,00	2400,00

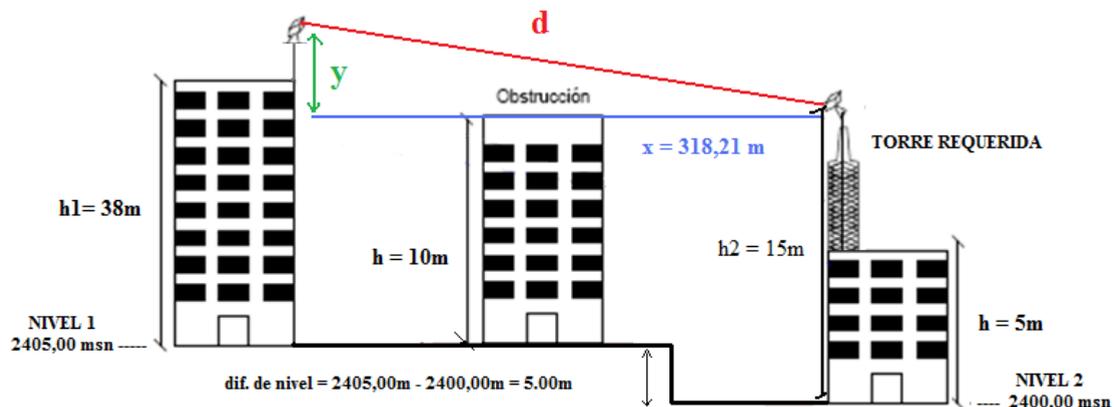
<b>DISTANCIA HORIZONTAL ENTRE EDIFICIOS [m]</b>
<b>318,21</b>

De acuerdo a los datos obtenidos se tiene el siguiente esquema:



**Figura 4.10** Gráfico de descripción de la obstrucción de la línea de vista para el enlace inalámbrico óptico propuesto

La altura del edificio que obstruye la línea de vista entre el Edificio Administrativo y los Laboratorios de Electrónica, y se muestra en la Figura 4.10, es de 10 metros (dato proporcionado por el departamento de construcciones), por esta razón se considera una torre de 10 metros de altura en los Laboratorios de Electrónica y una de 3 metros en el Edificio administrativo, para superar dicha obstrucción. Entonces se realizan los cálculos teniendo en cuenta el nuevo esquema:



**Figura 4.11** Solución a la obstrucción de la línea de vista para el enlace inalámbrico óptico propuesto

Luego:

$$y = h1 + \text{diferencia nivel} - h2$$

$$y = 38 \text{ m} + 5 \text{ m} - 15 \text{ m}$$

$$y = 28 \text{ m}$$

Y obtenemos:

$$d = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$d = \sqrt{(318,22 \text{ m})^2 + (28 \text{ m})^2}$$

$$d = \sqrt{101263,9684 \text{ m}^2 + 784 \text{ m}^2}$$

$$d = \sqrt{102047,9684 \text{ m}^2}$$

$$d = 319,4494 \text{ m}$$

La distancia real del enlace, distancia que recorrerá el haz óptico, es de **319,4494 metros equivalente a 0,31944 kilómetros.**

El valor anterior de distancia, se encuentra del rango permitido en las comunicaciones ópticas de espacio libre (actualmente hasta 10 kilómetros), permitiendo de esta manera un diseño sin serias complicaciones en lo que respecta al rango de las distancias permitidas.

De acuerdo a los datos citados, se puede considerar a la tecnología FSO como una alternativa que asegure el establecimiento del enlace citado. Esto porque la tecnología FSO permite cubrir sin mucha dificultad la distancia citada y aún más, teniendo actualmente como límite promedio los 10 km.

#### 4.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS FSO

##### 4.4.1 Análisis

Las características de los sistemas FSO serán evaluadas a través del margen del enlace o link margin, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$M_{link} = P_e + |S_r| - Aff_{Geo} - Aff_{Atm} - P_{Sist} \quad (4.1)$$

Donde:

$M_{link}$  es el margen del enlace o link margin

$P_e$  es la potencia de emisión de la señal (dBm)

$S_r$  es la sensibilidad del receptor (dBm)

$Aff_{Geo}$  es la atenuación geométrica del enlace (dB)

$Aff_{Atm}$  es la atenuación atmosférica del enlace afectada principalmente por la niebla (dB)

$P_{Sist}$  son las pérdidas del equipo, conectores fibra óptica y desalineamiento (dB)

Para garantizar el funcionamiento del sistema, el valor del margen del enlace o link margin no puede ser negativo.

#### 4.4.2 DISEÑO DEL ENLACE INALÁMBRICO ÓPTICO

Se realizarán en base a la ecuación del margen del enlace por la ecuación 4.1.

$$M_{link} = P_e + |S_r| - Aff_{Geo} - Aff_{Atm} - P_{Sist} \quad (4.1)$$

A continuación se describen los parámetros inmersos en la ecuación del margen del enlace o link margin.

##### 4.4.2.1 Potencia de emisión de la señal y Sensibilidad del Receptor

Los datos de la potencia de emisión de la señal y la sensibilidad del receptor son proporcionados por el fabricante de los equipos FSO. Para el diseño se ha considerado los datos típicos de los equipos FSO ofertados en el mercado por distintos fabricantes<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> Fabricantes de equipos FSO como SONABEAM y LIGHTPOINTE.

Dentro del campus de la ESPE, para los enlaces inalámbricos ópticos, se empleará el equipo de la tecnología FSO de marca SONABEAM modelo 1250-M (ver anexos); cuya potencia de emisión y sensibilidad son:

$$Pe = 140 \text{ mW}$$

$$Se = -20 \text{ dBm}$$

Este equipo es de características multihaz, lo que permite disminuir considerablemente efectos como la dispersión atmosférica, para el caso del modelo 1250-M se tiene 4 haces; lo que resultaría en la siguiente potencia de emisión:

$$Pe = 4 \times 140 \text{ mW}$$

$$Pe = 560 \text{ mW}$$

Para pasar la potencia de emisión de las unidades en miliwatios (mW) a dBm, se aplica la ecuación 4.2.

$$Pe_{dBm} = 10 \times \log(Pe_{mW}) \quad (4.2)$$

Aplicando la ecuación 4.2 se tiene:

$$Pe_{dBm} = 10 \log(Pe_{mW})$$

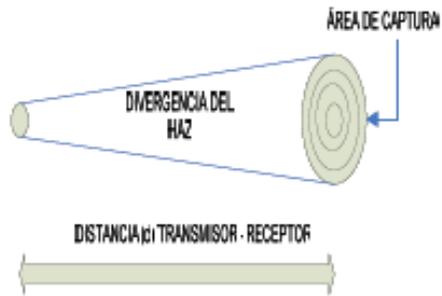
$$Pe_{dBm} = 10 \log(560)$$

$$Pe_{dBm} = 10 (2,748)$$

$$Pe_{dBm} = 27,48 \text{ dBm}$$

#### 4.4.2.2 Atenuación Geométrica

El haz emitido por el transmisor sufrirá divergencia, de esta manera la celda receptora recibirá únicamente una fracción de la energía emitida.



**Figura 4.12 Diagrama que muestra la propagación del haz de un láser**

La atenuación geométrica se describe de acuerdo a la ecuación 4.3.

$$Aff_{geométrica} = \frac{S_d}{S_{captura}} = \frac{\pi}{4} (d \cdot \theta)^2 \quad (4.3)$$

Donde:

$\theta$  es la divergencia del haz (miliradianes = mrad)

$d$  es la distancia que recorre el haz (metros = m)

$S_{captura}$  es el área de captura del receptor (metros cuadrados =  $m^2$ )

$S_d$  es el área del haz a una distancia ( $d$ )

La atenuación geométrica en dB se expresa según la ecuación 4.4.

$$Aff_{Geo(dB)} = 10 * \log_{10}(Aff_{geométrica}) \quad (4.4)$$

Es así que la atenuación geométrica es función de la divergencia del haz, la distancia y el área de captura.

El valor de la divergencia del haz considerado para el diseño del enlace inalámbrico óptico es 3 miliradianes. Cabe resaltar que este valor ha sido estimado tomando en cuenta que es el máximo posible de acuerdo a las características del enlace, esto porque los diseños deben ser siempre realizados tomando en consideración las

peores condiciones, para que de esta manera el funcionamiento del sistema diseñado sea óptimo en las condiciones normales de funcionamiento.

El área de captura, dato estándar de los fabricantes de equipos FSO, es de 0,025 metros cuadrados, valor con el que se realizan los cálculos.

Para realizar el cálculo del valor de la atenuación geométrica que representa el enlace inalámbrico óptico entre el Edificio Administrativo de la ESPE y los Laboratorios de Electrónica, se tienen los siguientes datos:

$$Divergencia = 0,003 \text{ radianes} = 3 \text{ miliradianes}$$

$$Distancia = 319,44 \text{ m}$$

$$\text{Área de Captura} = 0,025 \text{ m}^2$$

**Aplicando la ecuación 4.3.**

$$Aff_{geométrica} = \frac{S_d}{S_{captura}}$$

$$Aff_{geométrica} = \frac{\frac{\pi}{4} (d \theta)^2}{S_{captura}}$$

$$Aff_{geométrica} = \frac{\frac{\pi}{4} (319,44 \text{ m} \times 0,003 \text{ rad})^2}{0,025 \text{ m}^2}$$

$$Aff_{geométrica} = \frac{\frac{\pi}{4} (0,95832 \text{ m})^2}{0,025 \text{ m}^2}$$

$$Aff_{geométrica} = \frac{\frac{\pi}{4} (0,91837 \text{ m}^2)}{0,025 \text{ m}^2}$$

$$Aff_{geométrica} = \frac{0,72128}{0,025}$$

$$Aff_{geométrica} = 28,8512$$

$$Aff_{geométrica} = 28,85$$

**Expresado en dB según la ecuación 4.4.**

$$Aff_{Geo(dB)} = 10 \log_{10}(Aff_{geométrica})$$

$$Aff_{Geo(dB)} = 10 \log_{10}(28,85)$$

$$Aff_{Geo(dB)} = 10 \times 1,4601$$

$$Aff_{Geo(dB)} = 14,601dB$$

Basados en el precedente ejemplo de cálculo se presenta en la siguiente tabla los valores de la atenuación geométrica para el enlace inalámbrico óptico entre el Edificio Administrativo y los Laboratorios de Electrónica.

Los resultados se muestran en la tabla 4.4.

ENLACE	DISTANCIA (metros)	DIVERGENCIA (radianes)	ÁREA DE CAPTURA (metros Cuadrados)	ATENUACIÓN GEOMÉTRICA	ATENUACIÓN GEOMÉTRICA (dB)
Ed. Administrativo – Lab. de Electrónica	319,44	0,003	0,025	28,85	14,601

**Tabla 4.4 Atenuación Geométrica del Enlace**

La atenuación geométrica es un factor que limita la distancia del enlace inalámbrico óptico y puede reducir la disponibilidad del sistema, su valor será mayor en relación a cuan menor sea el área del receptor y a la distancia que tendrá que recorrer el haz de información.

Según los datos calculados, y tomando en cuenta un área de captura estándar para los equipos dentro de la ESPE; se observa una mayor atenuación en relación directamente proporcional con la distancia que tendrá que recorrer el haz del enlace inalámbrico óptico.

#### 4.4.2.3 Atenuación Atmosférica por Niebla

La atenuación atmosférica es descrita por la ley de Beer, la misma que puede ser expresada en función de la transmitancia.

La ley de Beer o ley de Beer-Lambert-Bouguer es una relación empírica que relaciona la absorción de la luz con las propiedades del material atravesado; en resumen, la ley explica que hay una relación exponencial entre la transmisión de luz a través de una sustancia y la concentración de la sustancia. Se expresa de acuerdo a la ecuación 4.5.

$$\frac{P(d)}{P(O)} = e^{-\sigma \cdot d} \quad (4.5)$$

Donde:

*P(d)* es la potencia de la señal a una distancia "d" del transmisor

*P(O)* es la potencia emitida

*e* es la relación exponencial

*σ* es el coeficiente de atenuación

*d* es la distancia que recorre el haz (kilómetros)

El valor del coeficiente de absorción varía según el material absorbente y se suele determinar experimentalmente.

La transmitancia es una magnitud que expresa la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo. La transmitancia óptica se define como la fracción de luz incidente, a una longitud de onda específica que pasa a través de una material; se expresa de acuerdo a la ecuación 4.6.

$$\tau(d) = \frac{P(d)}{P(O)} \quad (4.6)$$

Donde:

$\tau(d)$  es la transmitancia a una distancia "d" del transmisor

$P(d)$  es la potencia de la señal a una distancia "d" del transmisor

$P(O)$  es la potencia emitida

Finalmente, se relaciona la ley de Beer y la transmitancia, ecuación 4.5 y 4.6 respectivamente; igualando sus expresiones en la ecuación 4.7.

$$\tau(d) = \frac{P(d)}{P(O)} = e^{-\sigma \cdot d} \quad (4.7)$$

La atenuación atmosférica se relaciona con la transmitancia de acuerdo a la ecuación 4.8.

$$Aff_{Atm(dB)} = 10 * \log(1/\tau(d)) \quad (4.8)$$

El coeficiente de atenuación es la suma de cuatro términos, representados en la ecuación 4.9.

$$\sigma = \alpha_m + \alpha_n + \beta_m + \beta_n \quad (4.9)$$

Donde:

$\alpha_m$  es el coeficiente de absorción molecular

$\alpha_n$  es el coeficiente de absorción del aerosol

$\beta_m$  es el coeficiente de dispersión de Rayleigh

$\beta_n$  es el coeficiente de dispersión de Mie

El coeficiente de dispersión de Rayleigh,  $\beta_m$  es el resultado de la interacción de la luz con partículas de tamaño pequeño en relación a la longitud de onda.

El coeficiente de dispersión de Mie,  $\beta_n$  aparece cuando las partículas incidentes son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la onda transmitida.

Se debe tener en cuenta las siguientes características de los sistemas FSO:

- Las longitudes de onda de interés se encuentran entre 780 nm y 1550 nm
- Los coeficientes de absorción molecular, aerosol y dispersión Rayleigh son despreciables

Resultando entonces que el coeficiente de atenuación es dominado por la dispersión de Mie que, a su vez, está en función de la visibilidad.

Por lo tanto, en las longitudes de onda de interés el coeficiente de atenuación es descrito por la ecuación 4.10.

$$\sigma = \beta_n \quad (4.10)$$

La visibilidad es técnicamente definida como la distancia en la cual la intensidad de luz decrece a 2% de su valor inicial. Cualitativamente, la visibilidad es la máxima distancia en la cual aún es posible distinguir un objeto oscuro en el horizonte.

Los valores de visibilidad en relación con las condiciones ambientales que presente una localidad son los siguientes:

CONDICIONES AMBIENTALES	PRECIPITACIÓN		VISIBILIDAD	
		mm/hr		
<i>Niebla muy Espesa</i>			0 metros	
			50 metros	
<i>Niebla Espesa</i>			500 metros	
			600 metros	
	<i>Tormenta</i>	100	770 metros	
			1 kilómetros	
<i>Niebla Moderada</i>	Nieve	<i>Lluvia Fuerte</i>	25	1,9 kilómetros
				2 kilómetros
		<i>Lluvia Moderada</i>	12,5	2,8 kilómetros
				4 kilómetros
<i>Neblina</i>		<i>Lluvia Ligera</i>	2,5	5,9 kilómetros
<i>Despejado</i>			10 kilómetros	
		<i>Llovizna</i>	0,25	18,1 kilómetros
<i>Muy Despejado</i>			20 kilómetros	
			23 kilómetros	
			50 kilómetros	

Tabla 4.5 Valores de Visibilidad

La variación del coeficiente de atenuación con la visibilidad es descrita mediante la ley de Kruse, de acuerdo a la ecuación 4.11.

$$\sigma = \beta_n = \frac{3.912}{V} \left( \frac{\lambda_{nm}}{550} \right)^{-q} \tag{4.11}$$

Con:

$$q = \left\{ \begin{array}{ll} 1,6 & \text{si } V > 50\text{km} \\ 1,3 & \text{si } 6\text{km} < V < 50\text{km} \\ 0,16(V) + 0,34 & \text{si } 1\text{km} < V < 6\text{km} \\ V - 0,5 & \text{si } 0,5\text{km} < V < 1\text{km} \end{array} \right\}$$

Donde:

*V es la visibilidad en kilómetros*

*$\lambda_m$  es la longitud de onda en nanómetros*

*q es la dispersión de la partícula en el medio*

El factor **q** que depende de la dispersión de la partícula en el medio es proporcional y referente a ciertos rangos de visibilidad.

El cálculo de la atenuación atmosférica se realiza de acuerdo a las condiciones climáticas típicas de Quito, específicamente en la ESPE sector de Sangolquí.

Considerando el peor de los escenarios climáticos que pudieran presentarse en Sangolquí, el cual contempla la presencia de una lluvia torrencial y niebla al mismo tiempo, el valor promedio de visibilidad es de 770 metros, según la tabla 4.5 descrita anteriormente.

La longitud de onda a la que operan los equipos FSO en el espacio libre es 1550 nm.

Considerando la longitud de onda de operación y la visibilidad típica de Sangolquí.

$$\lambda_m = 1550 \text{ nm}$$

$$V = 770 \text{ m} = 0,77 \text{ km}$$

$$q = V - 0,5 = 0,77 - 0,5 = 0,27$$

Y aplicando la ecuación 4.11, se calcula el coeficiente de atenuación para los enlaces inalámbricos ópticos en las peores condiciones.

$$\sigma = \beta_n = \frac{3,912}{V} \left( \frac{\lambda_{nm}}{550} \right)^{-q}$$

$$\sigma = \beta_n = \frac{3,912}{0,77} \left( \frac{1500}{550} \right)^{-0,27}$$

$$\sigma = \beta_n = 5,0805(2,8181)^{-0,27}$$

$$\sigma = \beta_n = 5,0805(0,7559)$$

$$\sigma = \beta_n = 3,84$$

Con este valor se puede emplear la ley de Beer y calcular la transmitancia para el enlace inalámbrico óptico entre el Edificio Administrativo y los Laboratorios de electrónica, a partir de la ecuación 4.7.

$$\tau(d) = \frac{P(d)}{P(0)} = e^{-\sigma d}$$

$$\tau(d) = e^{-\sigma \cdot d}$$

$$\tau(d) = e^{-3,84 \times \left(\frac{319,44}{1000}\right)}$$

$$\tau(d) = e^{-1,22665}$$

$$\tau(d) = 0,2932734$$

Con el valor de la transmitancia, la atenuación atmosférica para el enlace inalámbrico óptico citado se calcula aplicando la ecuación 4.8.

$$Aff_{Atm.(dB)} = 10 \log\left(\frac{1}{\tau(d)}\right)$$

$$Aff_{Atm.(dB)} = 10 \log\left(\frac{1}{0,2932734}\right)$$

$$Aff_{Atm.(dB)} = 10 \log(3,409788)$$

$$Aff_{Atm.(dB)} = 10 (0,5327274)$$

$$Aff_{Atm.(dB)} = 5,327274$$

La atenuación atmosférica es gobernada por el fenómeno atmosférico conocido como niebla, que es el de mayor incidencia en los sistemas inalámbricos ópticos de la tecnología FSO; esto debido a las longitudes del diámetro de las partículas que conforman la niebla.

De esta manera se calcula el valor de la atenuación atmosférica producida por la neblina, para el enlace dentro del campus de la Escuela Politécnica del Ejército; resultados que se muestran en la tabla 4.6

ENLACE	DISTANCIA (metros)	$= n$	TRANSMITANCIA	ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA (dB)
ED. Administrativo – Lab. Electrónica	319,44	3,84	0,2932734	5,327274

**Tabla 4.6 Atenuación Atmosférica por Niebla**

De igual manera, que la atenuación geométrica, la atenuación atmosférica limita la distancia del enlace y puede reducir la disponibilidad del sistema de acuerdo a sus valores. Sabemos que la atenuación atmosférica se incrementa proporcionalmente con la distancia que tiene que recorrer el haz por el medio inalámbrico óptico.

#### 4.4.2.4 Pérdidas del Sistema

##### 4.4.2.4.1 Pérdidas de Equipos

Estos valores surgen de factores intrínsecos en los elementos electrónicos que componen los equipos FSO. Esta consideración además del hecho de que con el tiempo todos los equipos electrónicos sufren desgaste y cambio en sus propiedades de funcionamiento; exige que se considere un valor de reserva para adoptar la situación real. El dato de pérdida de un equipo FSO es dado por el fabricante. Se representa de la siguiente manera:

$$\alpha_e = \text{Pérdidas en equipo FSO [dB]}$$

Estos valores se presentan en la tabla 4.7.

ENLACE	ATENUACIÓN EQUIPOS (dB)
ED. Administrativo – Laboratorios Electrónica	1

**Tabla 4.7 Pérdidas de Equipo FSO**

#### 4.4.2.4.2 Pérdidas en Conectores

Los conectores que se necesitan son del tipo ST. El conector ST “Straight Tip” dispone de un mecanismo de sujeción en forma de bayoneta que fija la conexión al dar un cuarto de vuelta, disponible en versión multimodo y monomodo.

Los puertos de fibra óptica a donde se acoplaran los conectores se encuentran en la parte posterior de los switches de core y distribución ubicados en los racks de comunicaciones de los edificios que intervienen en el diseño del enlace inalámbrico óptico.

Los conectores introducen pérdidas que reducen la potencia de la señal, estas pérdidas se suman de acuerdo al número de conectores presentes en la interconexión de equipos necesarios para lograr la comunicación.

Las pérdidas de conectores, son en general valores bajos y son proporcionados por los fabricantes.

Se representa de la siguiente manera:

$$\alpha_c = \text{Pérdidas en conectores [dB]}$$

Establecer un enlace FSO con los equipos ubicados en las terrazas de los edificios correspondientes requiere de un conector hacia la parte posterior del switch de core o distribución. De esta manera se tiene por enlace dos conectores, lo cual introduce un valor de pérdidas bastante bajo, detallado en la tabla 4.8.

ENLACE	No. CONECTORES	ATENUACIÓN POR CONECTOR	ATENUACIÓN CONECTORES (dB)
Ed. Administrativo – Laboratorios Electrónica	2	0,5	1

**Tabla 4.8. Pérdidas de Conectores**

#### 4.4.2.4.3 Pérdidas en Fibra Óptica

Las pérdidas en la fibra óptica son directamente proporcionales con la distancia de la misma. Su valor oscila entre 5 y 10 dB por kilómetro.

Estas pérdidas son despreciables para nuestros enlaces, puesto que los tramos de fibra óptica que se necesitan para la conexión de los equipos FSO y los switches de core o distribución son bastante cortos.

Sus valores se presentan en la tabla 4.9.

ENLACE	ATENUACIÓN FIBRA ÓPTICA (dB)
ED. Administrativo – Laboratorios Electrónica	0

**Tabla 4.9 Pérdidas de Fibra Óptica**

De ahí que para el cálculo del margen del enlace no se consideran las pérdidas correspondientes a los tramos de fibra óptica que conectan los switches de core y switches de distribución con los equipos FSO que implementa el enlace inalámbrico óptico.

#### 4.4.2.4.4 Pérdidas por Desalineamiento

Esta clase de pérdidas se producen por un desalineamiento o desapuntamiento entre los equipos FSO. Cuando los haces no se encuentran perfectamente alineados se genera un margen de pérdida en la recepción de la señal, que se conoce como pérdida por desalineamiento.

El desalineamiento debe ser considerado en el diseño, puesto que existe la posibilidad de que ocurran errores en la instalación o por efectos externos como vientos, golpes, oscilación de la estructura de soporte, etc.

Aunque las pérdidas por desalineamiento no son función de la distancia del enlace, se debe notar que cuanto más alejados entre sí se encuentren los equipos, mayores serán las probabilidades de que se desalineen. Para el enlace presentado esta pérdida no ofrece gran valor.

ENLACE	DISTANCIA (metros)	ATENUACIÓN DESALINEAMIENTO (dB)
ED. Administrativo – Laboratorios Electrónica	319,44	1

**Tabla 4.10 Pérdidas por Desalineamiento**

La tabla 4.10 presenta la pérdida por desalineamiento; esta es independiente de la distancia del enlace, y tiene más relación con el montaje de los equipos FSO y el error de apuntamiento entre el equipo transmisor y receptor.

#### 4.4.2.4.5 Pérdidas del Sistema

Las pérdidas del sistema son el resultado de la suma de las pérdidas de los equipos FSO, los conectores de fibra óptica, los tramos de fibra óptica y el desalineamiento en el montaje de los equipos.

Estos valores han sido calculados anteriormente, y se presentan en conjunto en la tabla 4.11.

ENLACE	PÉRDIDAS DE EQUIPOS (dB)	PÉRDIDAS EN CONECTORES (dB)	PÉRDIDAS DE FIBRA ÓPTICA (dB)	PÉRDIDAS POR DESALINEAMIENTO (dB)	PÉRDIDAS DEL SISTEMA (dB)
ED. Administrativo – Laboratorios Electrónica	1	1	0	1	3

Tabla 4.11 Pérdidas del Sistema

#### 4.4.3 Margen de Enlace o Link Margin

Se calcula en base a la ecuación 4.1 anteriormente mencionada.

$$M_{link} = P_e + |S_r| - Aff_{Geo} - Aff_{Atm} - P_{Sist}$$

Para el enlace propuesto en este proyecto el cálculo del margen de enlace se realiza de acuerdo a los siguientes datos previamente calculados:

$$P_e = 27,48 \text{ dBm}$$

$$S_r = -20 \text{ dBm}$$

$$Aff_{Geo} = 14,601 \text{ dB}$$

$$Aff_{Atm} = 5,327274 \text{ dB}$$

$$P_{Sist} = 3 \text{ dB}$$

Entonces de acuerdo a la ecuación 4.1

$$M_{link} = P_e + |S_r| - Aff_{Geo} - Aff_{Atm} - P_{Sist}$$

$$M_{link} = 27,48 \text{ dBm} + 20 - \text{dBm} - 14,601 \text{ dB} - 5,327274 \text{ dB} - 3 \text{ dB}$$

$$M_{link} = 24,55 \text{ dB}$$

La tabla 4.12 presenta los valores calculados para el enlace propuesto de enlaces; y en los anexos se presenta el cálculo detallado de manera continua.

<b>ENLACE</b>	
<b>Ed. Administrativo – Laboratorios Electrónica</b>	
DISTANCIA (metros)	319,44
Potencia de Emisión (dBm)	27,48
Sensibilidad (dBm)	-20
Atenuación Geométrica (dB)	14,601
Atenuación Molecular (dB)	5,3272741
Perdidas de Sistema (dB)	3
MARGEN DE ENLACE (dB)	24,55

**Tabla 4.12 Margen de Enlace o Link Margin**

Los datos de la tabla 4.12 muestran que el enlace inalámbrico óptico es factible de realizarlo, puesto que el margen del enlace no es negativo.

#### 4.5 ESQUEMA DEL ENLACE PROPUESTO

Una vez realizado el análisis del margen de enlace, tomando en cuenta todas las consideraciones de diseño mencionadas; se puede presentar un esquema físico del enlace inalámbrico óptico propuestos en este proyecto.

La Figura 4.13 muestra la nueva topología física que se podría implementar a futuro con los enlaces inalámbricos ópticos dentro de la ESPE, específicamente el diseño del enlace entre el Ed. Administrativo y los Laboratorios de Electrónica, conectando los switches de core o de distribución según el caso.

---

En la Figura 4.14 aparecen únicamente el enlace inalámbrico óptico diseñado, en la misma se detallan el valor de la distancia de espacio libre que tendrá que recorrer el haz infrarrojo y muestran también la jerarquización de los switches de la red.

El valor de la distancia del enlace inalámbrico de espacio libre, es considerado desde las terrazas de los edificios que van a realizar la conectividad.

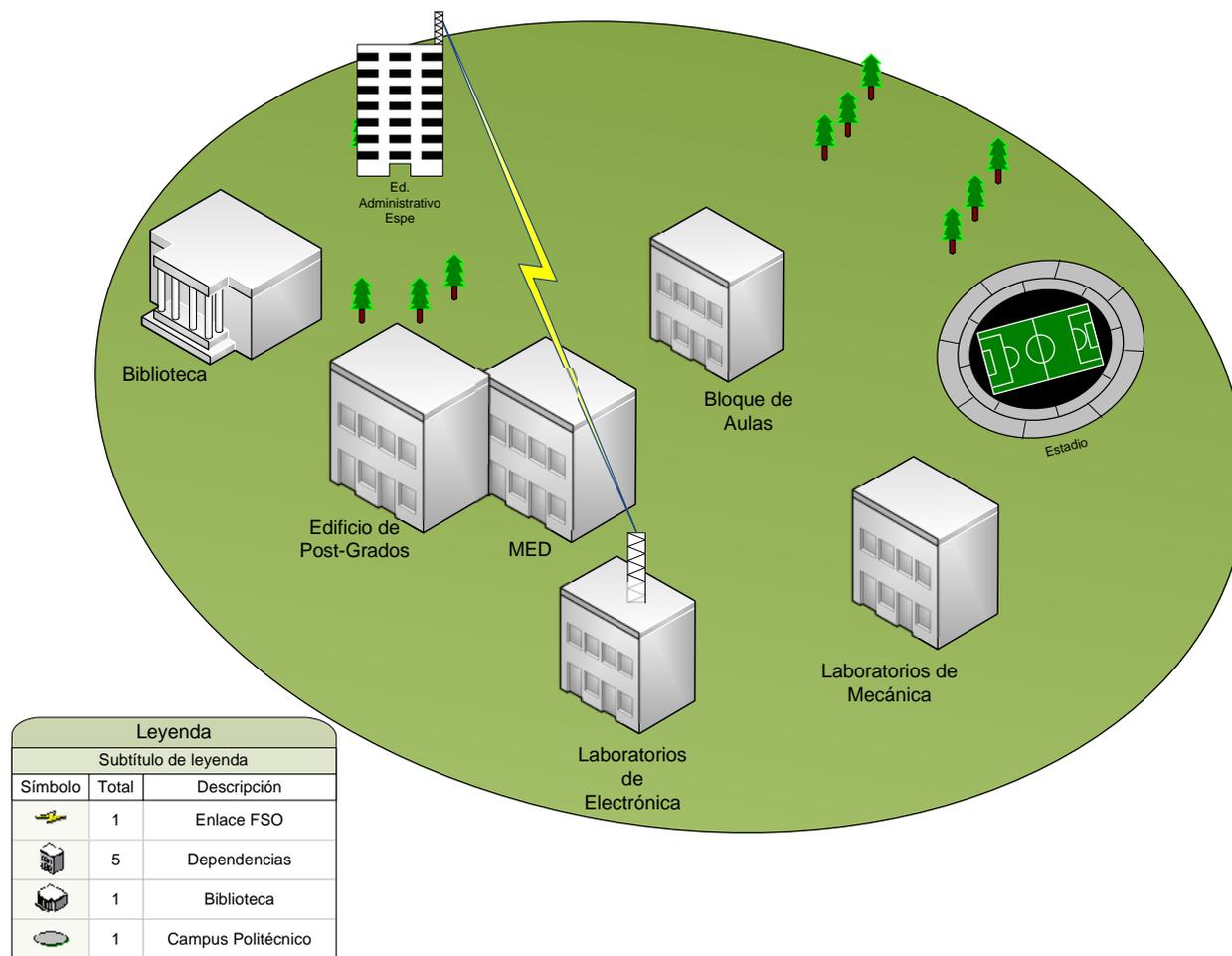


Figura 4.13 Esquema Físico del Enlace Propuesto

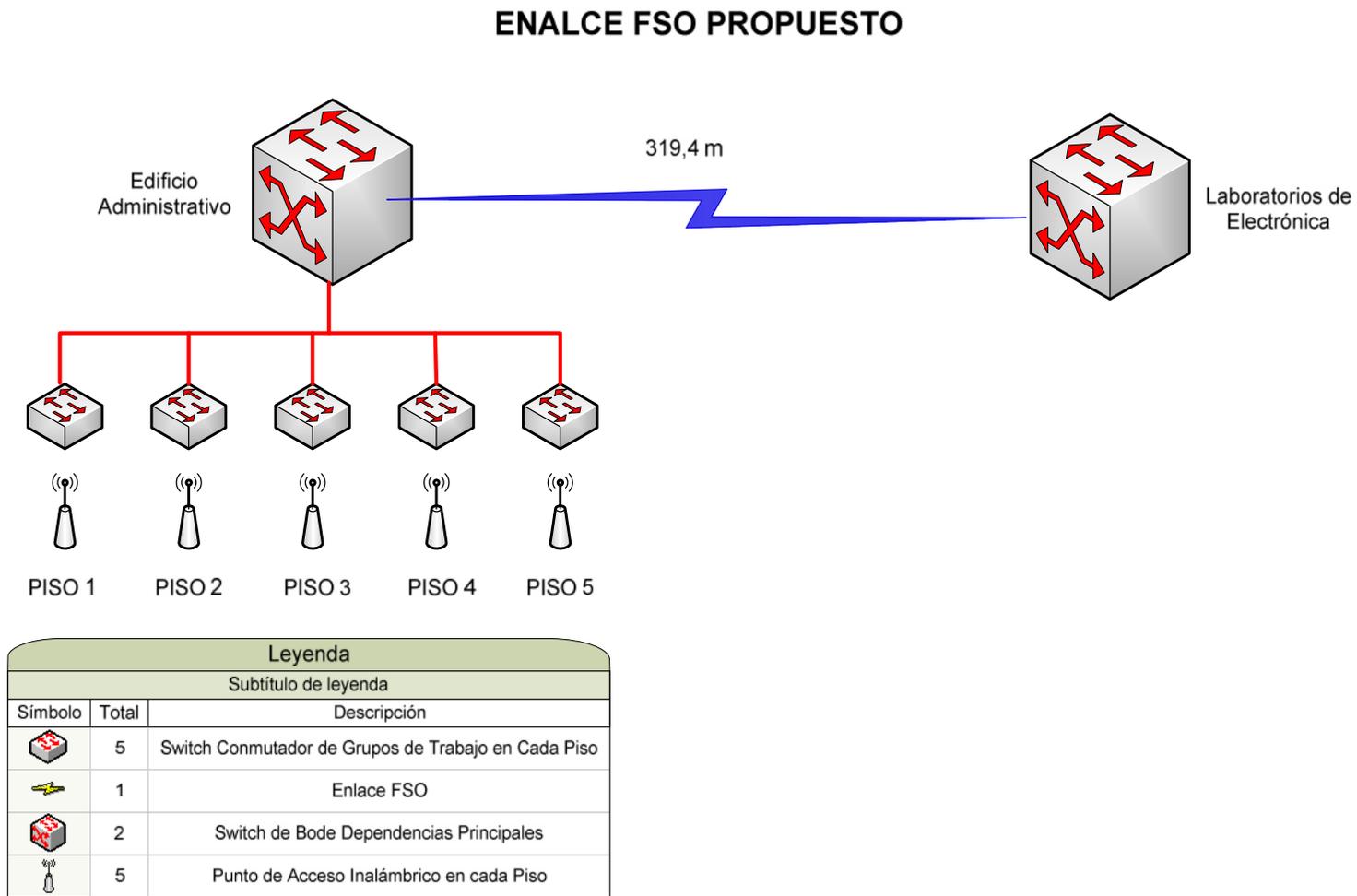


Figura 4.14 Enlace Inalámbrico Óptico propuesto para el Ed. Administrativo y los Laboratorios de Electrónica de la ESPE.

### 4.5.1 Parámetros principales

Los principales parámetros que deben ser tomados en cuenta en la definición de enlaces ópticos son el rango, la seguridad, el tiempo de propagación de los datos y las recomendaciones de implementación.

#### 4.5.1.1 Rango

Este varía de acuerdo a las características de los equipos, los cuales pueden cubrir desde unas pocas decenas de metros hasta kilómetros. Ciertos fabricantes proporcionan un rango máximo, otros especifican el rango típico para varias condiciones del tiempo, y otro proponen un rango recomendado; estos valores deben ser tomados como órdenes de magnitud, y no como valores absolutos.

Las características de los equipos utilizados en el diseño del enlace inalámbrico óptico descrito en este capítulo se encuentran en el Anexo 3, pero vale la pena recalcar que los rangos de cobertura de dichos equipos se encuentran dentro del margen especificado por el fabricante.

#### 4.5.1.2 Seguridad

La seguridad es sin duda alguna un factor importante que se debe tomar en cuenta dentro de las características de los enlaces inalámbricos ópticos. Los parámetros que definen la categoría de un láser son la longitud de onda de la señal, la potencia y la forma del haz.

##### 4.5.1.2.1 Peligros del láser

Cualquier láser puede presentar daños al hombre, tanto a nivel ocular como a nivel cutáneo.

Los efectos cutáneos no se consideran en la tecnología FSO porque los niveles de energía de los equipos FSO no presentan un riesgo significativo para la piel.

Sin embargo, el ojo humano es muy sensible a la radiación infrarroja y de ahí los cuidados respecto a los efectos oculares. Los factores más importantes que se deben tomar en cuenta para evaluar los riesgos son: la longitud de onda de la señal, la potencia manejada, y la forma del haz.

La tabla 4.13 detalla algunos efectos para tres rangos de longitud de onda de interés.

Longitud de Onda	550 - 700 nm	700 – 1000 nm	1500 – 1800 nm
Emisión	Visible - rojo	Infrarrojo cercano IR-A	Infrarrojo lejano IR-B
Efectos Cutáneos	Efectos no significantes		
Efectos Oculares	Porcentaje de transmisión y absorción de la señal láser		
Transmisión	90%	50%	0%
Absorción	Retina <sup>12</sup> : 90%	Córnea <sup>13</sup> : 0% Humor vítreo <sup>14</sup> : 50%	Córnea: 90% Humor vítreo <sup>15</sup> : 10%
Efectos en el ojo (para umbrales que exceden MPE <sup>16</sup> )	Retina: calentamiento, quemaduras, lesiones limitadas pero irreversibles.	Retina: Calentamiento, quemaduras, lesiones limitadas pero irreversibles. Lente cristalino: lesiones potenciales	Córnea: Opacamiento potencial

**Tabla 4.13 Efectos de los láseres semiconductores estándar sobre la piel y los ojos**

Los siguientes parámetros nos permiten clasificar y cuantificar el riesgo:

- **Categorías o clases**, estas definen el riesgo y nivel de potencia, una descripción obligatoria para cualquier producto láser
- **AEL (Límite Accesible de Emisión – Accesible Limits Emission)**, una categoría que corresponde con la potencia que es emitida por el aparato láser

<sup>12</sup> La retina es una de las tres membranas del segmento posterior del ojo cuya misión es transformar el estímulo luminoso en estímulo nervioso. Se extiende desde el nervio óptico hasta la pupila.

<sup>13</sup> La córnea es la parte anterior de la esclerótica (cubierta externa y consistente del ojo), su estructura es transparente.

<sup>14</sup> El humor vítreo es un líquido gelatinoso y transparente que rellena el espacio entre la retina y el cristalino (cumple la función de amortiguar ante posibles traumas).

<sup>15</sup> El humor acuoso es un líquido claro que fluye por la córnea, el iris y el cristalino.

<sup>16</sup> MPE = Máxima exposición permisible

- **MPE (Máxima Exposición Permisible - Maximum Permissible Exposure)**, un factor de riesgo que aplica sobre el nivel de radiación láser al cual una persona puede ser expuesta sin efectos nocivos o de cambios adversos biológicos sobre los ojos o la piel.

#### 4.5.1.2.2 Concepto de Categorías

El estándar EN 60825-1 definido por la Comisión Electrotécnica Internacional clasifica los láseres en 7 clases. Cada clase se define de acuerdo a los valores de potencia emitida por el láser y la tolerancia del usuario, es decir los límites accesibles de emisión AEL.

Estas clases son usadas para determinar el nivel de riesgo de la radiación láser, en función de calcular o chequear la atenuación necesaria para evitar sufrir daño; su clasificación se muestra en la tabla 4.14.

Categoría o clase	Riesgos asociados
1M	Dispositivo de baja potencia que emite radiación a una longitud de onda en la banda de 302.5- 4000 nm. Incluyendo visión con el uso de instrumentos ópticos (binoculares, microscopios)
1	Dispositivo de baja potencia que emite radiación a una longitud de onda en la banda de 302.5- 4000 nm. Se exceptúa la visión utilizando instrumentos ópticos
2M IIM	Dispositivo de baja potencia que emite radiación visible (en la banda de 4000- 700 nm). La protección ocular normalmente está asegurada por las defensas reflejas, incluyendo el cierre del parpado. El reflejo del parpado provee protección efectiva bajo muchas condiciones incluyendo el uso de instrumentos ópticos.
2 (II)	Dispositivo de baja potencia que emite radiación visible (en la banda de 400- 700 nm). La protección ocular igual que en el caso anterior por reflejo del exceptuando el uso de instrumentos ópticos. (binoculares, microscopios)
3R (IIIR)	Dispositivo de potencia promedia que emite radiación en la banda de 302.5- 400 nm. La visión directa es potencialmente peligrosa.
3B (IIIB)	Dispositivo de potencia promedio que emite radiación en la banda de 302.5- 400 nm. La visión directa del haz es siempre peligrosa.
4 (IV)	Dispositivo de alta potencia. Siempre hay daño del ojo y de la piel, existe riesgo de fuego

*Tabla 4.14 Clasificación de los láseres*

#### 4.5.1.2.3 Límites de Emisión Accesible (AEL)

El AEL representa la potencia emitida por el equipo láser, su valor se expresa en vatios, el valor AEL de un aparato óptico, permite clasificarlo.

Los valores de AEL y las categorías asociadas, se presentan en la tabla 4.15, y pueden ser calculados para sistemas basados en su potencia óptica emitida y condiciones normales de operación.

Clase o Categoría	Longitud de onda = 850 nm	Longitud de onda = 1550 nm
1	P < -6,6 dBm P < 0,22mW	P < 10 dBm P < 10 mW
	Rango de operación 400 – 700 nm	
2	P < -6,6 dBm P < 0,22 mW	P < 10 dBm P < 10 mW
3R	-6,6 dBm < P < 3,4 dBm 0,22 mW < P < 2,2 mW	10 dBm < P < 17 dBm 10 mW < P < 50 mW
3B	34 dBm < P < 27 dBm 2,2 mW < P < 500 mW	17 dBm < P < 27 dBm 50 mW < P < 500 mW
4	P > 27 dBm P > 500 mW	P > 27 dBm P > 500 mW

*Tabla 4.15 Clasificación de Límites de emisión accesible en watt y dBm*

#### 4.5.1.2.4 Máxima Exposición Permisible (MPE)

Para asegurar la protección de la piel o los ojos se han definido valores límites de exposición para la personas. Estos límites corresponden a las condiciones bajo las cuales el ojo o la piel humana pueden ser expuestos sin sufrir lesiones.

La máxima exposición permitida se expresa en  $Wm^{-2}$ . Ellos son usados para determinar el nivel de riesgo de la radiación láser. Dichos valores no deben ser considerados como valores límites precisos entre seguridad y niveles dañinos; y sus valores se presentan en la tabla 4.16.

Duración de la Exposición (segundos)	1	2	4	10	100	1.000	10.000
MPE ( $Wm^{-2}$ ) a 850 nm	36	30	25	20	11	6,5	3,6
MPE ( $Wm^{-2}$ ) a 1550 nm	5600	3300	1900	1000	1000	1000	1000

**Tabla 4.16 Valores MPE en ( $Wm^{-2}$ ) del ojo (córnea) de acuerdo a la duración de exposición (en segundos) y longitud de onda**

El MPE es mayor para exposiciones de duración breves que para altos tiempos de exposición, esto quiere decir que para cortas duraciones de exposición la tolerancia será mayor. El MPE a nivel de córnea es mucho mayor a 1550 nm que a 850 nm; esto es relacionado a la radiación láser de absorción al nivel de varios componentes del ojo.

#### 4.5.1.3 Tiempo de propagación

El tiempo de propagación de la información que permiten los enlaces inalámbricos ópticos proporcionados por los equipos FSO, es una característica importante y merecedora de mencionar.

Se debe tomar en cuenta que la mayoría de equipos FSO es transparente al protocolo de transmisión, así ninguna acción se lleva a cabo sobre el contenido o la naturaleza de los datos, evitando retardos y ofreciendo tiempos de propagación cortos.

Los parámetros a ser tomados en cuenta en el cálculo del tiempo de propagación de la señal son los siguientes:

- Tiempo de procesamiento electrónico de equipos FSO (equipos de emisión y recepción)
- Tiempo de propagación de la luz en la atmósfera entre equipos de transmisión y recepción.

El tiempo de propagación de la luz en la atmósfera, se puede definir en relación con la distancia recorrida por el haz, de acuerdo a la ecuación 4.12.

$$t_p = \frac{d}{v_c} \quad (4.12)$$

Donde:

$t_p$  = tiempo de propagación de la luz

$d$  = distancia que recorre la luz

$v_c$  = velocidad de la luz =  $3 \times 10^8$  metros/segundo

Tomando como referencia el desplazamiento en un metro de un haz luminoso, se tendría de acuerdo a la ecuación 4.12.:

$$t_p = \frac{d}{v_c}$$

$$t_p = \frac{1m}{3 \times 10^8 \frac{m}{seg}}$$

$$t_p = 3 \times 10^9 seg$$

De esta manera, el tiempo total de propagación de la señal luminosa, será la suma de los tiempos de propagación de la luz y del tiempo de procesamiento electrónico de los equipos. Todo lo cual se muestra en la ecuación 4.13.

$$t_t = t_p + t_{pe} \quad (4.13)$$

Donde:

$t_t$  = tiempo total de propagación

$t_p$  = tiempo de propagación de la luz

$t_{pe}$  = tiempo de procesamiento electrónico

#### 4.5.1.3.1 Tiempo de propagación de los enlaces inalámbricos ópticos

El tiempo de procesamiento electrónico, primer parámetro a consideración, es uno que viene dado por los fabricantes de los equipos de comunicación óptica en espacio libre FSO.

Este tiempo de procesamiento electrónico para un equipo FSO, es en general el siguiente:

$$t_{pe} = 3 \times 10^{-7} s$$

Al tratarse de enlaces inalámbricos ópticos que requieren el uso de dos equipos, uno para transmisión y otro para recepción de las señales; el tiempo de procesamiento electrónico de los equipos FSO se duplica. Obteniendo el siguiente valor:

$$t_{pe} = 3 \times 10^{-7} s \times 2$$

$$t_{pe} = 6 \times 10^{-7} s$$

El otro parámetro a considerar es el tiempo de propagación de la luz en la atmósfera, el mismo que se obtiene de acuerdo a la ecuación 4.12.

Para el enlace correspondiente propuesto, se tiene como valor de tiempo de propagación de la luz, de acuerdo a la ecuación 4.12.:

$$t_p = \frac{d}{v_c}$$

$$t_p = \frac{319,44 m}{3 \times 10^8 \frac{m}{seg}}$$

$$t_p = 1,0648 \times 10^{-6} seg$$

Aplicando la ecuación 4.13, el tiempo de propagación total para el enlace mencionado es:

$$t_t = t_p + t_{pe}$$

$$t_t = 6 \times 10^{-7} seg + 1,0648 \times 10^{-6} seg$$

$$t_t = 1,66 \times 10^{-6} seg$$

$$t_t = 1,66 \mu seg$$

A continuación se indica los tiempos calculados de propagación de la señal inalámbrica óptica del enlace diseñado dentro de la Escuela Politécnica del Ejército; valores que se muestran en la tabla 4.17.

Nº	ENLACES	Distancia (m)	Tiempo de Procesamiento Electrónico equipos FSO (seg)	Tiempo de Propagación de la luz en la atmósfera (seg)	Tiempo total de Propagación (seg)	Tiempo total de propagación (µseg)
1	Ed. Administrativo – Lab. Electrónica	319,44	6,00E-07	1,0648E-06	1,66E-06	1,66

**Tabla 4.17 Tiempo de propagación de las señales**

Con los datos calculados y presentados en la tabla anterior, se puede concluir que los tiempos de propagación son muy cortos, del orden de los microsegundos; haciendo del enlace diseñado muy rápido y casi imperceptible a su retardo.

#### 4.5.1.4 Recomendaciones de implementación

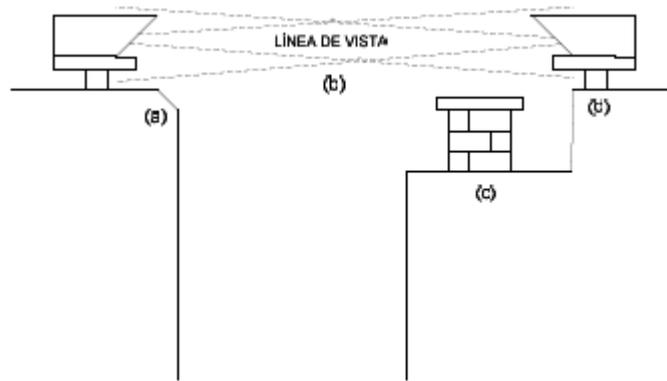
Los equipos FSO que, permiten la transmisión recepción de las señales inalámbricas ópticas, deben tener como cualquier equipo de comunicaciones unas consideraciones básicas para su implementación (montaje).

De manera general, el equipo FSO tiene necesidades similares de implementación que los equipos usados en los sistemas de radio. Entre ellas podemos mencionar:

- Instalación en puntos altos (como edificios o torres)
- Presencia de línea de vista, sin obstáculos en la trayectoria presente o futura
- El tiempo de instalación es inferior a un día por enlace

Sin embargo, debido a la tecnología utilizada y los requisitos de seguridad relacionados con los equipos tipo láser, algunas consideraciones de la implementación deben ser tomadas en cuenta al momento de la instalación.

La Figura 4.15 muestra un enlace inalámbrico óptico y las recomendaciones a tomar en cuenta en el momento de la implementación de los enlaces inalámbricos ópticos.



*Figura 4.15 Enlace Inalámbrico Óptico*

- Se debe evitar la proximidad de calor y superficies reflectantes de luz, las cuales pueden crear interferencia
- La presencia de línea de vista es necesaria
- Evitar chimeneas que emitan humo o vapor de agua en el trayecto de las señales inalámbricas ópticas
- Escoger un lugar seguro, rígido para el montaje de los equipos FSO

Los equipos deben tener una alineación muy precisa de ser necesaria la baja divergencia de un haz de láser transmitido.

El acoplamiento de un enlace óptico es caracterizado por el alineamiento entre el transmisor y receptor, ya que el enlace puede ser perturbado por vibraciones naturales, como vientos.

El instalador del sistema de comunicación debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Fijar el material en un soporte rígido o en un muro con capacidad de carga, para que sea sometido lo menos posible a vibraciones o choques (por ejemplo, fuera de los bordes de las paredes y los lados de las paredes)
- Evitar la alineación directa de los lentes ópticos con los rayos del sol
- Evitar la proximidad de elementos que puedan causar turbulencia atmosférica (como chimeneas y superficies reflectantes)

## **4.6 PRINCIPIOS TÉCNICOS DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS DE ESPACIO LIBRE**

### **4.6.1 Topologías Redundantes**

Es deseable disponer un tiempo continuo de actividad en las redes, se torna ideal un tiempo de actividad del 100%, y aunque en la práctica esto resulta bastante difícil, se procura alcanzar un tiempo de actividad referencial denominado de cinco nueves o del 99,999%.

Tener la mayor disponibilidad en una red implica contar con equipos y diseños totalmente confiables y tolerantes a las fallas. De esta manera las redes podrán sobreponerse rápidamente de cualquier tipo de falla que se pueda presentar en el funcionamiento de equipos y administración de las redes. Esta característica se denomina Redundancia.

Uno de los objetivos de las topologías redundantes es eliminar las interrupciones del servicio de la red que se puedan presentar por un único punto de falla.

Otro, y el que para la presente tesis tiene particularidad importancia, es el de proveer un medio físico alternativo para el intercambio de la información. Es así que la redundancia que se presentará con el diseño del enlace inalámbrico óptico es en el medio de transmisión.

El medio físico de transmisión alternativo al que se hace referencia es el espacio libre, puesto que como anteriormente se ha mencionado la tecnología de propagación inalámbrica óptica, FSO, transmite y recibe información por el mencionado medio.

#### 4.6.2 Regulación de equipos FSO

Tomando en cuenta el artículo 1.5 del Reglamento de Radiocomunicaciones, éste define a las ondas de radio u ondas hertzianas como: “*ondas electromagnéticas cuyas frecuencias son actualmente menores a 3.000 GHz y que se propagan en el espacio sin una guía artificial*”.

Las longitudes de onda usadas en la transmisión de los equipos FSO no están actualmente cubiertas por las disposiciones del Reglamento de Radiocomunicaciones, las cuales limitan frecuencias menores a 3.000 GHz

De hecho los equipos FSO normalmente funciona en el rango de frecuencias entre 150 y 500 THz.

Esta es la razón por la que no existe legislación, gestión y atribución en esta parte del espectro, resultando consecuentemente de ausencia de impuestos o gastos relacionados con las atribuciones de licencias.

Sin embargo, esto fue notado en la Conferencia de Plenipotenciarios de la ITU<sup>17</sup> en el 2002, observando que las técnicas de radiocomunicación permiten utilizar a las ondas electromagnéticas sin guía artificial sobre los 3.000 GHz; definiendo así una nueva resolución para el uso del espectro sobre los 3.000 GHz (Resolución 118, Marrakech, 2002<sup>18</sup>).

---

<sup>17</sup> La Conferencia de Plenipotenciarios de la ITU es el organismo de más alto rango dentro de la Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU.

<sup>18</sup> Ver anexo

Esta resolución considerando que el UIT-R va a emprender estudios sobre la utilización del espectro hasta 3.000 GHz, contempla las siguientes recomendaciones:

- A petición de la asamblea de radiocomunicaciones se solicita el “estudiar en el marco del programa de trabajo ¿Qué posibilidad e importancia tiene la inclusión en el Reglamento de Radiocomunicaciones de las bandas de frecuencias por encima de 3.000 GHz?
- Autorizar al próximo WRC incluir en su agenda los puntos relativos a las frecuencias más altas que 3.000 GHz e introducirlas si es necesario las disposiciones concernientes a estas frecuencias en el Reglamento de Radiocomunicaciones

La entrada en vigor del nuevo reglamento dependerá de los cambios consecuentes en el anexo 1.005 de la convención de la próxima conferencia plenipotenciaria.

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISIS FINANCIERO

#### INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expondrán los valores de costos estimados del diseño del Enlace Inalámbrico Óptico en el Espacio Libre entre el Edificio Administrativo y los Laboratorios de Electrónica de la ESPE, que ha sido diseñado para mejorar las actuales características y dar redundancia a la comunicación mediante fibra óptica que actualmente posee.

Se mencionarán los implementos, equipos y demás requerimientos necesarios para el diseño del enlace, presentando los costos individuales, para luego obtener los valores totales del Enlace.

Las informaciones presentadas han sido obtenidas de información de proveedores que se encuentran en el Internet así como de proveedores del mercado nacional, considerando únicamente el valor del proveedor que ofrece mejores costos y características.

Los equipos más costosos como se verá son precisamente los de tecnología FSO que se requieren para conectar el enlace, también, aunque un poco menos costosa resulta la torre necesaria en los Laboratorios de Electrónica tomando en cuenta que actualmente existe una torre en la terraza de los laboratorios de Electrónica y lo único que hay que hacer es darle un poco de mantenimiento para que esté en óptimas condiciones de uso y finalmente los equipos adicionales.

## 5.1 COSTOS

### 5.1.1 COSTO DE INSTALACIÓN DE LA TORRE NECESARIA EN LOS LABORATORIOS DE ELECTRÓNICA

Como se mencionó en el capítulo de diseño, no existe línea de vista entre el Edificio Administrativo y los Laboratorios de electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército, por esta razón se hace necesario reincorporar la torre que ya existe en los laboratorios de Electrónica, de tal manera que permita tener línea de vista entre ambos puntos.

A continuación se detallan en las tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 las características sobre el tipo de torre que se debería instalar y sus costos, así como los costos que demandaría el poner en servicio la torre ya existente en los Laboratorios. Estos datos fueron proporcionados por una de las empresas<sup>51</sup> que se encuentra en el mercado.

<b>Altura de la Torre</b>	<b>10 metros</b>
<b>Número de Secciones</b>	2
<b>Tipo de Material de Fabricación</b>	Tubo de 2 ½" y de 2" Perfil L 50 x 3 mm Perfil L 40 x 3 mm. Acero 1 ½" Acero 5/8" Bridas Perfil U 50x3 mm., Perfil L 25x3 mm., Pernería, Pintura, Soldadura, Galvanizado.

#### *5.1 Características de la Torre a Construir*

<b>Valor de la Torre (incluyendo la base de concreto)</b>	<b>\$2000,00</b>
<b>Valor de la Instalación</b>	<b>\$500,00</b>
<b>Valor Total</b>	<b>\$2500,00</b>

*Tabla 5.2 Valor de la Torre a Construir*

<b>Altura de la Torre</b>	<b>10 metros</b>
<b>Número de Secciones</b>	<b>2</b>
<b>Tipo de Material de Mantenimiento</b>	Perfil L 50 x 3 mm Acero 5/8" Bridas Pernería, Pintura, Soldadura, Galvanizado.

### *5.3 Características y materiales para el mantenimiento de la Torre existente en los Laboratorios de Electrónica*

Valor del Mantenimiento de la Torre	\$200,00
Valor de la Instalación segunda sección	\$100,00
<b>Valor Total</b>	<b>\$300,00</b>

*Tabla 5.4 Valor del Mantenimiento de la Torre ya existente*

Una vez analizadas cada una de las alternativas, considerando, tiempo, costo vida útil, se ha llegado a la conclusión de que la mejor alternativa es dar mantenimiento a la antena ya existente, en vista de que brindará el mismo servicio y es costo será mucho menor.

## **5.1.2 EQUIPOS DE CONECTIVIDAD**

Es importante acotar que los equipos que a continuación se detallaran son los de mejores características tanto técnicas como de costos, razón por la cual se escogieron.

### **5.1.2.1 Equipos de Óptica de Espacio Libre (FSO)**

Los precios de los equipos FSO, son variables en función de los fabricantes y de las características de los mismos.

Para el diseño del enlace, se han seleccionado los equipos que proporcionen el mejor desempeño y que provean el rango de alcance necesario entre los nodos analizados.

Se han considerado equipos FSO marca FSONA, uno de los fabricantes líderes en tecnología FSO, y sus características de operación se muestran con detalle en los anexos. Para el establecimiento del enlace dentro del campus de la ESPE, se ha seleccionado a los equipos FSO de la marca FSONA modelo SONABEAM 1250 – M.

Considerando que únicamente un (1) enlace inalámbricos óptico es el que se va a desarrollar dentro de la ESPE, según el diseño presentado en el capítulo anterior, razón por la que se considera el costo de dos (2) equipos FSO para el enlace mencionado.

La tabla 5.5 detalla las características y el precio del equipo FSO mencionado.

Equipos / Características	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Cabecera FSO Marca: FSONA Modelo: SONABEAM 1250-M  Longitud de onda De espacio libre: 1.550 nm Capacidad: 1,4 Gbits/s Alcance: 1.700 m Núcleo de haces: 4	02	\$ 5420,30	\$10840,60
<b>Valor Total</b>			<b>\$10840,60</b>

*Tabla 5.5 Valores de Equipos FSO para conexión dentro de la ESPE*

Como se puede apreciar, el equipo recomendado cumple con los requerimientos de ancho de banda y distancia del enlace inalámbrico óptico diseñado dentro del campus de la ESPE; valores correspondientes a 1223,3 kbits/s en lo que respecta a la capacidad de transmisión y de 319,44 metros respecto a la máxima distancia a cubrir.

### 5.1.2.2 Conectores y Fibra Óptica

#### 5.1.2.2.1 Conectores

Los conectores que se requieren para realizar la conexión de los equipos FSO con los switches de core o de distribución son conectores de fibra óptica del tipo ST.

Estos conectores se insertan en cada extremo del segmento de fibra que es necesario para conectar por un lado el equipo de óptica de espacio libre (FSO) ubicado en la terraza y por el otro el equipo conmutador (switch) ubicado en el rack de comunicaciones de cada edificio.

En total se necesita 4 conectores para poder realizar el enlace (2 en cada extremo) que corresponden a los conectores que se ubican en la parte posterior del switch.

Los valores correspondientes a los costos de los conectores se muestran en la tabla 5.6.

Conector Tipo ST Plástico			Cantidad por ubicación (Tx/Rx)	Valor Unitario	Valor Total
ENLACE	1	Ed. Administrativo-Lab. Electrónica	4	\$2,08	\$8,32
	<b>VALOR TOTAL</b>				<b>\$8,32</b>

*Tabla 5.6 Valores de Conectores*

#### 5.1.2.2.2 Segmentos de Fibra Óptica

Los segmentos de fibra óptica que se requieren para la conexión son relativamente cortos en comparación con los grandes tramos que se tienden normalmente para una conexión común de fibra por tierra o aire.

Los segmentos comprenden una distancia aproximada equivalente al tamaño del edificio en el cual serán colocados los equipos FSO. Como ya se mencionó anteriormente,

deben recorrer la distancia que va desde la terraza hasta el rack de comunicaciones localizado en cada uno de los edificios a comunicar.

Como en este caso el enlace es independiente, para este enlace se requiere: un par de equipos, y un par de segmentos de fibra (una fibra en cada edificio).

Los segmentos de fibra se considerarán de un valor entero en función de redondear al valor más alto requerido, el cual es de 50 metros para el Edificio Administrativo, éste ha sido determinado en función de que el edificio tiene una altura de 38 metros y si se considera que la fibra seguirá una trayectoria más o menos recta desde la terraza hasta el rack, añadiendo a este un valor de holgura de 10 metros adicionales, entonces tendremos un valor de recorrido de hasta 50 metros.

Para los Laboratorios de Electrónica necesitamos 20 metros, éste ha sido determinado en función de que el edificio tiene una altura de 10 metros y si se considera que la fibra seguirá una trayectoria más o menos recta desde la terraza hasta el rack, añadiendo a este un valor de holgura de 10 metros adicionales, entonces tendremos un valor de recorrido de hasta 20 metros.

La fibra óptica que se utilizará es del tipo Multimodo externa de 6 hilos, 62,5/125 um, cuyo costo se detalla en la tabla 5.7.

Fibra Óptica Multimodo 6 hilos MM			Cantidad (m)	Valor por metro	Valor Total
<b>ENLACE</b>	1	Ed. Administrativo- Lab. Electrónica	70	\$3,50	\$245,00
<b>VALOR TOTAL</b>					<b>\$245,00</b>

*Tabla 5.7 Valores de Segmentos de Fibra Óptica*

### 5.1.3 LICENCIAS

Como se ha venido explicando la tecnología FSO trabaja en una banda no licenciada, es decir que no requiere del pago de concesiones o licencias por el uso del espectro. Esta ventaja le permite al sistema operar libremente y reducir los costos de operación frente a otras alternativas inalámbricas.

## 5.2 COSTO DE SOLUCIÓN DE LOS ENLACES FSO (ÓPTICA DE ESPACIO LIBRE)

### 5.2.1 Costos del Enlace FSO entre el Ed. Administrativo y los Laboratorios de Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército

Para el caso de los enlaces de Óptica de Espacio Libre (FSO), no se requieren cables de fibra óptica entre los puntos de conexión puesto que la tecnología es inalámbrica y aplica como medio físico el aire.

Esta situación permite lograr una serie de ventajas técnicas y económicas, entre ellas cabe recordar algunas ya mencionadas:

- Se logra un ahorro en material y mano de obra
- Se instala los equipos con gran simplicidad técnica
- El despliegue y funcionamiento del sistema es inmediato
- Se logra acceder a lugares difíciles de una manera simple siempre que exista línea de vista

El diseño de enlace que se ha desarrollado en el presente proyecto de titulación de Ingeniero Electrónico es:

1) Edificio Administrativo – Laboratorios de Electrónica.

A continuación se detalla, en la tabla 5.8, el costo de la implementación del enlace FSO propuesto, que ha sido diseñado para la conexión entre los edificios de la Escuela Politécnica del Ejército antes mencionados.

Ítems	Cantidad	Unidad	Características	Valor Unitario	Valor Total
1	2	Unidades	Equipos FSO "FSONA"	\$5420,30	\$10840,00
2	4	Unidades	Conectores ST	\$2,08	\$8,32
3	70	Metros	Fibra Óptica Mm de 4hilos	\$3,50	\$245,00
4	1		Mantenimiento Torre	\$300,00	\$300,00
<b>Total</b>					<b>\$11393,32</b>

*Tabla 5.8 Valor Total del enlace propuesto*

Si se quisiera implementar una red global con enlaces FSO para todo el campus politécnico de la ESPE, los costos son equivalentes puesto que se emplean el mismo tipo de equipos FSO, cantidades aproximadas de cable de fibra óptica y la misma cantidad de conectores; por esta razón se asumirían costos equivalentes para el resto de enlaces dentro de la ESPE.

En este cálculo de costos, la mano de obra no se ha incluido en los gastos del enlace por cuanto será incorporada en el cálculo final del costo aproximado total del enlace inalámbrico FSO.

### 5.2.2 Costos Totales del Enlace Inalámbrico Óptico en el Espacio Libre (FSO)

El costo total aproximado para la implementación del enlace inalámbrico óptico en el espacio libre (FSO) en las instalaciones de la ESPE, objeto del presente diseño, considera los costos del conjunto de enlace que involucran básicamente los equipos, conectores y fibra óptica, adicionalmente se debe considerar la mano de obra e instalación.

La tabla 5.9 resume el costo total estimado para el enlace inalámbrico óptico diseñado en la presente tesis.

Características	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Equipos FSO "FSONA"	2	\$5420,30	\$10840,00
Conectores ST	4	\$2,08	\$8,32
Fibra Óptica Mm de 4hilos	70	\$3,50	\$245,00
Mantenimiento Torre		\$300,00	\$300,00
<b>Subtotal</b>			<b>\$11393,32</b>
<b>Mano de Obra e instalación (2%)</b>			<b>\$227,86</b>
<b>Valor Total</b>			<b>\$11.621,18</b>

*Tabla 5.9 Valor Total del Enlace FSO*

La mano de obra e instalación se ha considerado como en un valor del 2% del subtotal del proyecto.

### 5.3 COSTOS DE SOLUCIÓN POR FIBRA ÓPTICA

#### 5.3.1 Costos de Enlaces de Fibra Óptica en el Enlace Propuesto

La solución por Fibra Óptica es la que se tiene actualmente en la red de la Escuela Politécnica del Ejército. Su implementación requirió de una fuerte inversión para lograr establecer la conexión existente.

Para aproximarnos al valor del costo del enlace cableado de fibra óptica en la Escuela Politécnica del Ejército, analizamos el costo de implementación de un anillo de fibra óptica para el campus de la ESPE y posteriormente lo dividimos para el número de enlaces, de esta manera se puede tener una idea del valor que tendría el enlace propuesto realizado con fibra óptica

De acuerdo a la información proporcionada por las UTIC, el costo de inversión para el montaje de un anillo de fibra óptica que abarque las comunicaciones del campus de la ESPE más o menos se encuentra en un valor de \$ 80000,00 dólares, para establecer siete enlaces.

Si hacemos un breve análisis podemos darnos cuenta que cada enlace tiene un valor alrededor de 11500,00 dólares, esto nos proporciona una idea del costo que representa tender un enlace de fibra óptica y así poder tener un criterio de comparación frente a la propuesta de óptica de espacio libre (sin fibras).

#### **5.4 Comparación de Costos entre las Soluciones Inalámbrica Óptica FSO y la Solución Cableada de Fibra Óptica.**

La tecnología FSO tiene costos comparables con los de sistemas cableados como la Fibra Óptica, en los cálculos obtenidos se obtuvo un valor de **\$11621,18 dólares** para FSO frente a **\$11500,00 dólares** para fibra óptica, aunque la tecnología FSO resulto un poco más costosa, tiene muchas ventajas con respecto a las facilidades de implementación, montaje, y pagos por derechos de paso, arriendos de postes y licencias por uso del espectro.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 CONCLUSIONES

- Los sistemas de comunicación inalámbrica óptica (FSO) son sistemas similares a los de la fibra óptica, que aprovechan la transmisión de fotones para enviar datos pero lo hacen a través del aire sin el uso de cables.
- La capacidad de transmisión de un sistema FSO actualmente es de hasta 2,5 Gbits/s, lo cual lo convierte en un sistema de gran ancho de banda que puede soportar fácilmente fuertes tasas de transferencia de datos, pudiéndose desempeñar como soporte secundario de una red o también como conexión principal de una red (backbone), dependiendo únicamente de las características de los equipos tanto de transmisión como de recepción.
- Un sistema FSO es de fácil implementación, característica que se traduce en una alternativa de rápido despliegue para una red de backbone, necesitándose únicamente de 3 a 4 horas para su instalación.
- El enlace inalámbrico óptico diseñado en el presente proyecto de titulación, actuará también como un camino redundante para su par de fibra óptica, logrando de esta manera un soporte sólido y brindando las garantías del caso.

- En el caso del presente trabajo, la distancia que se cubre es de 319,44 metros referente a la distancia de espacio libre entre las terrazas de los edificios Administrativo y los Laboratorios de Electrónica, distancia claramente cubierta considerando que el alcance de los equipos a utilizar es de 4800 m en aire limpio y de 2200 m en lluvia extrema.
- Los equipos FSO emplean para la transmisión en espacio libre, longitudes de onda que van de los 700 nm hasta los 1500 nm, lo cual significa que el sistema FSO es de alta frecuencia y supera a otros tales como las microondas que operan sobre los 40 GHz, las frecuencias que los equipos FSO SONABEAM Serie: 1250-M usan para la transmisión en espacio libre son de 1550nm para longitud de onda alcanzando los 193 THz, de esta manera en cuanto a seguridad estaría en la categoría 2M, garantizando la seguridad ocular no causando daños sobre los ojos o la piel.
- La tecnología FSO no requiere de licencia o pago de impuesto alguno por el uso de frecuencias del espectro electromagnético a un organismo regulatorio de las telecomunicaciones, es decir la ESPE no tendrá que pagar ningún valor por concepto de frecuencia para este enlace.
- La seguridad de la información transmitida por FSO es garantizada ya que los haces de transmisión son muy estrechos (típicamente mucho menores que 0,5 grados) a diferencia de los haces que presentan los enlaces de microondas cuyos valores están entre los 5 y 25 grados.
- Para interceptar la información el “intruso” debería conocer el origen exacto del transmisor inalámbrico óptico, o en su caso conocer el sitio de localización del receptor inalámbrico óptico del láser infrarrojo, para así poder interceptar el rayo solo dentro de un ángulo muy estrecho de propagación
- La interceptación directa de un haz inalámbrico óptico entre dos sitios remotos de red es prácticamente imposible, debido al hecho que el haz de transmisión es

invisible y que cualquier esfuerzo por bloquear el haz tendría que ocurrir cerca de los puntos terminales del equipo inalámbrico óptico

- El principal problema del medio de transmisión en las comunicaciones inalámbricas ópticas de espacio libre es el medio ambiente, específicamente los cambios climáticos, los cuales puede atenuar la potencia de la señal y dificultar la comunicación, la presente tesis, consideró las peores condiciones ambientales que se puedan presentar, estas son la posibilidad de tener lluvia torrencial y niebla densa al mismo tiempo, lo que permitiría una visibilidad de hasta 770 metros, estas condiciones no son típicas en Sangolquí.
- El máximo valor de atenuación por neblina (atenuación molecular) corresponde a 5,3272741 dB para el enlace propuesto entre el Edificios Administrativo y los Laboratorios de Electrónica, este valor de atenuación molecular es directamente proporcional con la distancia que recorre dicho enlace.
- El enlace inalámbrico óptico diseñado, tendrán un adecuado funcionamiento incluso con la presencia de lluvia fuerte, niebla moderada y nieve , ya que la visibilidad es de aproximadamente 800 metros en las condiciones mencionadas
- Los otros valores considerables de pérdidas corresponden a las atenuaciones geométricas, relacionadas las mismas con la distancia del enlace, divergencia del haz y área de captura del receptor
- El enlace del sistema FSO que se diseña en la presente tesis, considera la máxima divergencia del haz (3 miliradianes) y el área de captura estándar de los equipos FSO (0,025 metros cuadrados). Estos datos producen valores de atenuación geométrica de 14,601 dB.
- Los otros valores de pérdidas (correspondientes a las pérdidas en conectores, equipos FSO, fibra óptica y desalineamiento) son pequeños valores y no afectan de manera sensible la disponibilidad de los enlaces diseñados.

- El margen de enlace o link margin, valor que permite conocer si un enlace es factible de realizar, para la presente tesis tiene un valor de 24,55 dB.
- El presente diseño ha seguido un esquema que emule el enlace de modo que se pueda obtener redundancia con enlaces FSO.
- La conexión entre el Edificio Administrativo y los Laboratorios de Electrónica, requiere de una torre de 10 metros de altura que proporcione la línea de vista necesaria entre dichos edificios, así como un soporte de 3 metros para la instalación de los equipos FSO.
- La tasa de transmisión que actualmente necesita este enlace es de 1223 kbits/s, en ese sentido se puede decir que no tendrá ningún inconveniente considerando que los equipos que han sido seleccionados para el enlace brindan una tasa de transmisión de 1,25 Gbps dúplex.
- El costo resultante del enlace FSO es comparable con el costo de implementación de un enlace con fibra óptica, si bien los equipos FSO son moderadamente costosos, presentan grandes ventajas por la facilidad de instalación y acceso en ubicaciones difíciles
- La tecnología FSO tiene costos comparables con los de sistemas cableados como la Fibra Óptica, en los cálculos obtenidos se obtuvo un valor de **\$11621,18 dólares** para FSO frente a **\$11500,00 dólares** para fibra óptica, aunque la tecnología FSO resulto un poco más costosa, tiene muchas ventajas con respecto a las facilidades de implementación, montaje, y pagos por derechos de paso, arriendos de postes y licencias por uso del espectro.
- La diferencia en costos entre la solución propuesta por los enlaces FSO y la de fibra óptica es de \$ 121,18 dólares. Cantidad que no representa un valor considerable, razón por la que la diferencia de costo no presenta una desventaja para el enlace inalámbrico óptico presentado en el presente trabajo de titulación.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- Se puede plantear un nuevo proyecto de titulación relacionado con el trabajo presentado en este documento, con el fin de analizar con detalle la disponibilidad de implementar los enlaces inalámbricos ópticos en todo el campus politécnico formando una red redundante.
- También puede ser de consideración para los compañeros un proyecto de titulación referente a la tecnología FSO como solución a los problemas que presentan distintas tecnologías de Última Milla
- La tecnología inalámbrica óptica puede converger con otros métodos para transmisión a fin de ampliar la cobertura de un servicio para grandes empresas o instituciones y aplicadas con éxito para interconectar redes de uso personal dentro de espacios pequeños como casas u oficinas.
- Considerando que FSO no tiene ningún impedimento legal de regulación ya que se transmite en un espectro no licenciado, este podría desarrollarse en nuestro país con grandes ventajas al igual que en el resto del mundo.
- Es importante recordar que la tecnología se desarrolla día a día, permitiendo un mejor funcionamiento de los enlaces FSO, razón por la cual se debe tomar muy en cuenta las características de los equipos que se necesitaran para cualquier aplicación.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

- [1] Heinz Willebrand, Baksheesh S. Ghuman, Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks, Sams Publishing, 2002
- [2] AGRAWAL, Govind P. Fiber-optic communication systems. 3.Ed. New York: John Willey & Sons, 2002.
- [3] Alan Harris, James J. Sluss, Jr., Hazem H. Refai. Free-space optical wavelength diversity scheme for fog mitigation in a ground-to-unmanned-aerial-vehicle communications link. Optical Engineering, Volume 45, Issue 8, August 2006
- [4] Manor, H., Arnon, S. Performance of an optical wireless communication system as a function of wavelength. Applied optics, Volume 42, Issue 21, Page 4285, Jul 2003
- [5] D'Amico, M, Leva, A. Micheli, B. Free-space optics communication systems: First results from a pilot field-trial in the surrounding area of Milan, Italy. IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS, Volume 13, Issue 8, Page 305, August 2003
- [6] BOUCHET, Olivier, SIZUN, Hervé, BOISROBERT, Christian, FORNEL, Frédérique de, FAVENNEC, Pierre-Noël. Free-Space Optics, Propagation and Communication. ISTE: London, 2006.//www.dixon-link.com/PDF/HOJA\_UTP\_CAT6\_9050.pdf
- [7] ARNON, Shlomi. Optical wireless communications. Encyclopedia of Optical Engineering. Beer-Sheva: Ben-Gurion University of Negev, 2003.
- [8] MELLES GRIOT. Gaussian Beam Optics [online]. 2008. Disponible: <http://www.mellesgriot.com/products/optics/> [capturado en 20 jul. 2008].
- [9] Tang, and others, "Message Encoding and Decoding Through Chaos Modulation in Chaotic Optical Communications," February 2002
- [10] S. Sheikh Muhammad, P. Köhldorfer, E. Leitgeb, Channel Modeling for Terrestrial Free Space Optical Link. Institute of Broadband Communication, TU Graz, Austria. IEEE, 2005
- [11] Lucas de Nardis, Wireless Optical Communications Part I, Telecommunication Engineering, School of Engineering, University of Rome La Sapienza, Italy. May. [http://www.comlab.uniroma3.it/cincotti\\_courses/Wireless\\_Optical\\_Comms\\_I.pdf](http://www.comlab.uniroma3.it/cincotti_courses/Wireless_Optical_Comms_I.pdf), 2006
- [12] Mike Nofziger, Optical Communications. Página de internet, College os Optical Sciences, <http://www.optics.arizona.edu/nofziger/UNVR195a/Class13/C13P1.htm>, Agosto 2006,
- [13] E. Leitgeb, J. Bregenzer, P. Fasser, M.Gebhart. Free Space Optics – Extension to Fiber- Networks for the Last Miles. Graz, Austria. IEEE, 2002

- [14] Vaidyanathan Ramasarma, Free Space Optics: A Viable Last-Mile Solution, Bechtel Telecommunications Technical Journal, December 2002
- [15] Dominic O'Brien, Free Space optical links for broadband wireless communication, University of Oxford, November 2003
- [16] P. B. Harboe, J. R. Souza. Sistemas Ópticos en el Espacio Libre: Estudio de la Viabilidad de Implantación en Ciudades Brasileñas. XX Simpósio Brasileiro de Telecomunicaciones. Rio de Janeiro, RJ, Octubre 2003.
- [17] fSONA, SONAbeam series Datasheet, fSONA Systems Ltd, <http://www.fsona.com>
- [18] Dave Steinke, Free-Space Optics: A Viable, Secure Last-Mile Solution?, As part of the Information Security Reading Room, SANS Institute, February 2003
- [19] Ahmet Akbulut, H. Gokhan Ilk, Fikret Ari, Design, Availability and Reliability Analysis on an Experimental Outdoor FSO/RF Communication System, Ankara University, Faculty of Engineering, Electronics Engineering Department, ICTON, IEEE, 2005
- [20] Scott Bloom, Eric Korevaar, John Schuster, Heinz Willebrand. Understanding the performance of free-space optics [invited]. Optical Society of America. Journal of Optical Networking. Vol. 2, No. 6, June 2003
- [21] Nolan T. Atkins, "Conventional Radar," Lyndon State College, 2 January 2002.
- [22] Electrophysics Corporation, [[www.electrophysicscorp.com](http://www.electrophysicscorp.com)], November 2003
- [23] Steve F. Russell, "Wireless Channel Security Tutorial," Iowa State University, 23 February 1997
- [24] Free Space Optics Communication for Mobile Military platforms - USNAVY
- [25] C Cuenca, C Palacio, Diseño de una Red Inalámbrica Óptica utilizando tecnología FSO, junio 2009

---

## FECHA DE ENTREGA

El proyecto fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa en la Escuela Politécnica del Ejército desde:

Sangolquí, a \_\_\_\_\_ de 2011

---

BOLÍVAR VINICIO ACOSTA SÁNCHEZ

050233447-7

## AUTORIDAD:

---

Ing. GONZALO OLMEDO Phd.

COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN  
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES